



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

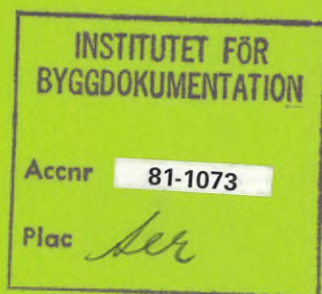
This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Borrhåslager i berg för säsongslagring av värme

Förstudie

Sören Andersson
Anders Eriksson
Johan Tollin



R/D

R66:1981

BORRHÅLSLAGER I BERG FÖR
SÄSONGLAGRING AV VÄRME

Förstudie

Sören Andersson
Anders Eriksson
Johan Tollin

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
791694-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till AIB - Allmänna Ingenjörbyrå AB, Stockholm.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

R66:1981

ISBN 91-540-3512-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1981 153635

INNEHÅLLSFÖRTECKNINGSid

| | |
|--|----|
| Förord | 5 |
| Sammanfattning | 7 |
| 1. Inledning | 9 |
| 1.1 Lagringsbehov | 9 |
| 1.2 Olika typer av säsongslager | 9 |
| 1.3 Borrhålslagret. Utvecklingsstadium | 9 |
| 2. Borrhålslagrets funktion och uppbyggnad | 12 |
| 2.1 Funktionsprinciper | 12 |
| 2.2 Driftstrategier | 15 |
| 2.3 Uppbyggnadssystem | 16 |
| 2.4 Utformning | 18 |
| 2.5 Termiska förlopp | 20 |
| 2.6 Parameterstudier | 24 |
| 3. Hydrogeologiska förutsättningar | 27 |
| 3.1 Allmänt | 27 |
| 3.1.1 Berggrund | 27 |
| 3.1.2 Jordlager | 28 |
| 3.1.3 Grundvatten | 28 |
| 3.1.4 Vattenkemi | 29 |
| 3.1.5 Temperaturförhållanden | 30 |
| 3.2 Bergets vattengenomsläpplighet | 31 |
| 3.2.1 Orientering | 31 |
| 3.2.2 Hydraulisk konduktivitet | 31 |
| 3.2.3 Naturligt grundvattenflöde | 42 |
| 3.2.4 Vattenförluster från borrhålen | 47 |

| | <u>Sid</u> |
|---|------------|
| 4. Förprojektering | 49 |
| 4.1 Syfte | 49 |
| 4.2 Förutsättningar | 49 |
| 4.3 Anslutning till distributionssystem | 52 |
| 4.4 Anläggning och installationer | 54 |
| 4.4.1 Mark- och borrhingsarbeten | 54 |
| 4.4.2 Installationer | 55 |
| 4.4.3 Byggnader | 58 |
| 4.5 Kostnader | 58 |
| 4.5.1 Anläggningskostnad | 58 |
| 4.5.2 Driftkostnad | 59 |
| 5. Fortsatta arbeten | 60 |
| Referenser | 61 |
| Summary | 63 |

FÖRORD

Allmänna Ingenjörbyrå AB, AIB, har i här presenterad förstudie utrett tekniska och ekonomiska förutsättningar för storskalig värmelagring i berg.

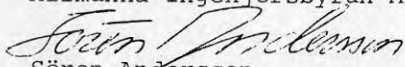
Förstudien har helt inriktats på det av AIB lanserade borrhålslagret med oinklädda borrhål.

I projektet har medverkat

| | | |
|------------|-----------------|-------------------|
| - tekn lic | Sören Andersson | AIB (proj ledare) |
| - tekn dr | Johan Claesson | LTH |
| - civ ing | Bengt Eftring | LTH |
| - geolog | Anders Eriksson | AIB |
| - civ ing | Jan Sandqvist | AIB |
| - civ ing | Johan Tollin | AIB |
| - tekn lic | Bengt Åberg | Stocksund |

Förstudien har genomförts under tiden mars-december 1980 i samarbete med Institutionen för Matematisk Fysik vid Lunds Tekniska Högskola.

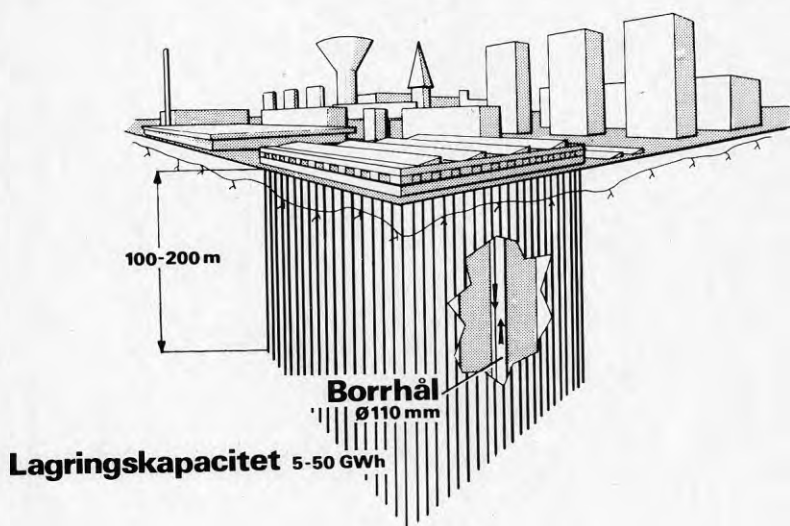
Stockholm december 1980
Allmänna Ingenjörbyrå AB


Sören Andersson



SAMMANFATTNING

Ett borrhålslager är ett storskaligt värmelager, vars funktion baseras på bergets värmelagrings- och värmeledningsförmåga. Värmen överförs till eller från berget med hjälp av vatten som cirkuleras genom ett stort antal borrhål. Borrhålen har förutsatts vara oinklädda.



Borrhålslager. Principskiss

Värmelagringsförmågan hos t ex gnejs och granit uppgår till ca $0,6 \text{ kWh/m}^3, ^\circ\text{C}$, dvs ungefär hälften av motsvarande värde för vatten. Ett borrhålslager måste således ges en dubbelt så stor volym som t ex ett vattenfyllt bergrum vid lika lagringskapacitet och lika differens mellan in- och utlagringstemperaturerna.

Det värmebärande vattnet, fluiden, kan cirkuleras i borrhålen i öppna eller slutna system.

I ett slutet system leds fluiden i U-formade rör, som installerats i borrhålen. Borrhålen är i sin tur fyllda med grundvatten, som överför värme mellan rören och berget i borrhålsväggen. Fluiden, som cirkuleras i de U-formade rören, kommer aldrig i kontakt med berget. Även om berget är sprickigt, uppkommer därför inga vattenförluster. Vidare blir det inga problem med kemiska utfällningar i rör, värmeväxlare etc. Ett borrhålslager med slutet cirkulationssystem kan därför anläggas även i sprickig berggrund under förutsättning att den naturliga grundvattenströmningen ej är alltför hög. En kraftig grundvattenström genom borrhålslagret kan medföra en olämplig transport av den lagrade värmen i grundvattenströmningens riktning. Omfattande mätningar av den svenska berggrundens vattengenomsläpplighet har utförts, bl a inom projekt Kärnbränslesäkerhet, KBS, och av Statens Vattenfallsverk. Mätningarna visar att berggrunden som regel har så låg genomsläpplighet att en naturlig grundvattenström ej menligt påverkar ett lager av denna typ.

I ett öppet system leds fluiden, som då alltid är vatten, genom ett rör ned till borrhålets botten, varefter den strömmar upp genom borrhålet under direkt kontakt med berget i borrhålsväggen. Det öppna systemet förutsätter i normalfallet att trycket i borrhålet är högre än det som motsvaras av omgivande grundvattenstånd. Systemets funktion kräver därför ett relativt tätt berg för att vattenförlusten från borrhålen ej skall bli för stor.

Vid öppna system måste särskild uppmärksamhet ägnas åt bergets sprickighet, förekomst av krosszoner etc. Preliminära studier tyder dock på att även öppna system generellt kan användas. Lagrets överyta kan dock med hjälp av packers i borrhålen behöva förläggas på tillräckligt djup under bergets ofta sprickiga ytzon.

Inom förstudien har en förprojektering utförts av ett fullskaligt borrhålslager. Förprojekteringen visar att ett sådant lager kan byggas med nu känd och beprövad teknik.

Ett borrhålslager för ca 30 GWh får en verkningsgrad på över 90 % och kan anläggas till en kostnad av 1,30 kr per lagrad och uttagbar kWh. Under antagande av kostnadsfri laddningsenergi har den totala driftkostnaden, inkl kapitalkostnader, beräknats till 0,16 kr/kWh. Om laddningsenergi kan erhållas under sommarmånaderna till en kostnad av 0,05 kr/kWh kan lagret leverera vintervärme för 0,21 kr/kWh.

Ett borrhålslager är väl lämpat att byggas ut i etapper, varigenom onödiga kapital- och värmeförlustkostnader undviks.

1. INLEDNING

1.1 Lagringsbehov

Energibehovet i Sverige för uppvärmning av byggnader har för år 2000 uppskattats till omkring 120 TWh. Enligt officiella prognoser kan upp emot 10% av detta energibehov komma att täckas av sådana energikällor, främst sol- och spillvärme, som normalt kräver säsongslagring. Ett antagande att t ex 60% av den senare energimängden, dvs ca 7 TWh, skulle lagras i vattenmagasin med en arbetande temperaturdifferens på 50°C innebär att en lagringsvolym av storleksordningen 100 milj m³ kommer att erfordras.

Det är således uppenbart att även ett relativt lågt utnyttjande av sol- och spillvärme kommer att innebära ett stort behov av lämpliga säsongslager. Den svenska berggrunden erbjuder härvid praktiskt taget obegränsade lagringsmöjligheter.

1.2 Olika typer av säsongslager

Ett säsongslager måste med hänsyn till värmeförluster vara stort. Speciellt gäller detta för i princip oisolerade lager som t ex akviferer och bergrum. Lagret måste dessutom vara billigt, eftersom utnyttjningsgraden är låg, vanligen en gång per år.

Användning av betong- eller plåt-cisterner, eller grupper av sådana, torde i regel vara uteslutet såväl med hänsyn till de alltför höga kostnaderna som till svårigheterna att estetiskt och säkerhetsmässigt inpassa sådana anläggningar i befintlig eller planerad bebyggelse.

Intresset har därför kommit att fokuseras på lager av typ akviferer, sjömagasin, bergrum (utlastade eller blockfyllda) och under senare tid även på "borrhåls-lagret".

1.3 Borrhålslagret. Utvecklingsstadium

Borrhålslagret, fig 1.1, tilldrar sig för närvarande ett stort intresse såväl i Sverige som utomlands. Lagret kan närmast liknas vid en jättelik värmeväxlare i vilken värme överförs till respektive från berget med hjälp av vatten som cirkulerar i borrhålen.

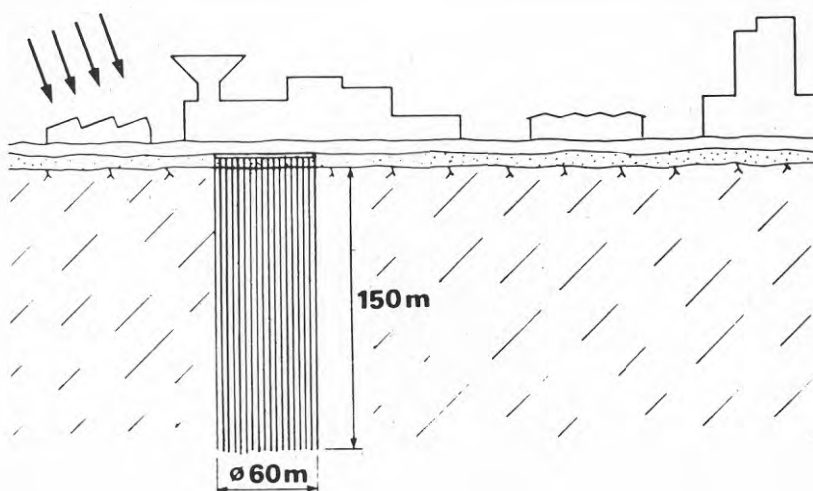


Fig 1.1 Borrhålslager. Principskiss

Lagertypen synes första gången ha föreslagits av G Brun, Ecole des Mines, Frankrike, 1967 [1]. I anslutning till ett tänkt solvärmeprojekt skisserades ett borrhålslager med 9000 hål, 200 m djupa. Hålavståndet var ca 3 m. Borrhålen antogs inklädda med plåt. Laddning och urladdning avsågs ske med hjälp av ånga, 300 till 500°C, som i slutna system cirkulerades genom borrhålen. Idén har dock inte vidareutvecklats.

I Sverige har lagringsprincipen i liten skala tillämpats i Sunroc-projektet [2]. Härvid har endast låga lagringstemperaturer, ca 30°C, använts. Lagret har utförts med infodrade borrhål.

Ett borrhålslager för högre temperaturer, 40-80°C, har studerats av H Kadesjö, 1979 [3]. Även i detta koncept har förutsatts en typ av foderrörsinklädda borrhål.

Det av AIB föreslagna borrhålslagret med oinfodrade borrhål har studerats av B Johansson och B Nordell, 1980 [4].

Ett lager enligt "borrhålslagerprincipen" finns utfört i Kungsbacka, där U-formade plastslangar nedtryckts till 35 m djup i lera. Lagret har dock andra detaljlösningar och temperaturintervall än här presenterat lager, G. Hultmark BFR R 38:1980.

I en förstudie benämnd "Utvinning av värme ur bergborrade brunnar" BFR R142:1980 har AIB undersökt de teoretiska förutsättningarna för värmeuttag och värmeinlagring genom värmeväxling mellan berg och vatten i bergborrade brunnar. I studien ingår en översikt över termiska förhållanden i den svenska berggrunden.

Avdelningen för Vattenteknik vid Högskolan i Luleå genomför i samarbete med AIB för närvarande en magasinsanalys av ett planerat försöksområde i anslutning till högskolan.

Matematiska beräkningsmodeller för lagringssystem av typ borrhålslager har utarbetats vid Lunds universitet, M Johansson och J Claesson [5]. Utveckling av beräkningsmodeller för olika driftstrategier pågår för närvarande i samarbete med AIB.

Här presenterad studie sammanfattar och bygger vidare på bl a ovan angivna arbeten. Studien redovisar dels allmänna tekniska och ekonomiska förutsättningar för värmelagring i borrhålslager, dels inriktning och omfattning av erforderlig fortsatt utveckling av lagertypen.

2. BORRHÅLSLAGRETS FUNKTION OCH UPPBYGGNAD

2.1 Funktionsprinciper

Borrhålslagrets funktion baseras på bergets värmelagrings- och värmeledningsförmåga. Värmen överförs till eller från berget med hjälp av en vätska, i regel vatten, som cirkuleras genom ett stort antal borrhål. Fig 2.1.

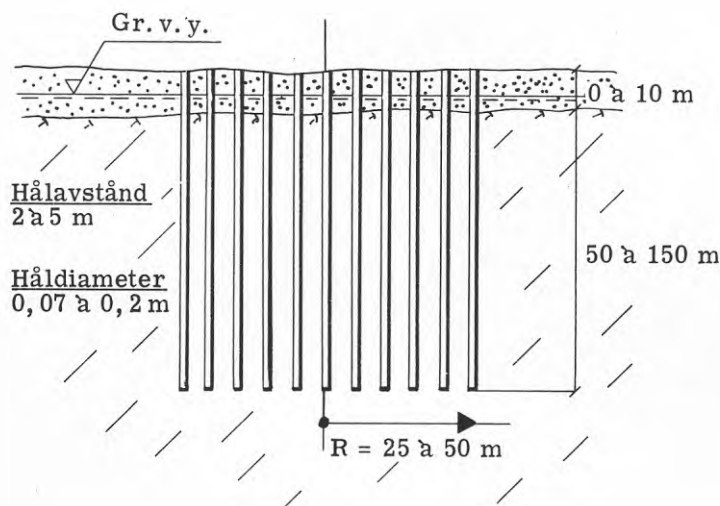


Fig 2.1 Cirkulär cylindriskt borrhålslager.
Principskiss

Värmelagringsförmågan hos t ex gnejs och granit uppgår till ca $0,6 \text{ kWh/m}^3$, dvs ungefär hälften av motsvarande värde för vatten. Ett borrhålslager måste således ges en dubbelt så stor volym som t ex ett vattenfyllt bergrum vid lika lagringsskapacitet och lika differens mellan in- och utlagringstemperaturerna.

Funktionsdata såsom maximal laddnings- och uttagseffekt, energi- och temperaturverkningsgrad bestäms av borrhålsavstånd, borrhålsdiameter, lagerstorlek etc. Se närmare avsnitt 2.6.

Vid laddning ledes varmt vatten genom en slang eller ett rör ned till borrhålets botten, varefter det strömmar upp genom borrhålet under direkt kontakt med berget i borrhålsväggen. Det uttagna vattnet, som nu har en något lägre temperatur än det inkommande, ledes till nästa borrhål eller till värmeväxlare för återuppvärmning. Fig 2.2a. Cirkulationssystemet kan även utföras slutet. Fig 2.2b. Borrhålet är då fyllt med grundvatten som överför värmets mellan det U-formade röret och berget i borrhålsväggen.

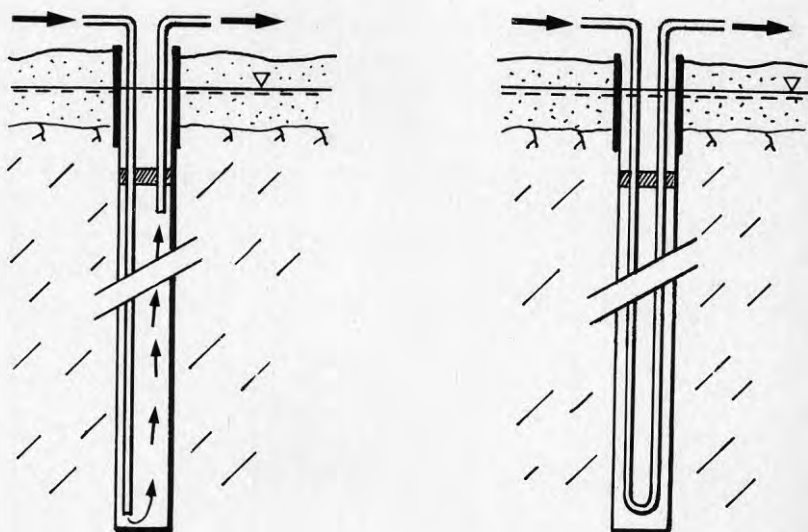


Fig 2.2 a) Öppet cirkulationssystem.
Laddning eller urladdning

b) Slutet cirkulationssystem.
Laddning eller urladdning

Vid urladdning ledes kallt vatten genom borrhålet, varvid vattnet upptar och bortför den i berget upplagrade värmen.

Det öppna cirkulationssystemet förutsätter att trycket i borrhålet är högre än det som motsvaras av grundvattenståndet. Vattnet i de delar av rörsystemet, värmeväxlare, etc, som ligger ovanför markytan bör nämligen ur praktisk synpunkt inte ha lägre tryck än atmosfärstrycket. Erforderlig skillnad bestäms av den nivå på vilken ovanjordsinstallationerna placerats samt på de tryckförluster som uppstår i systemet. Borrhålet måste därför i sin övre del förses med en avstängning enl fig 2.2a. Omgivande berg måste vara relativt tätt för att vattenförlusten från borrhålet ej skall bli för stor, se närmare avsnitt 3.2.

I ett slutet cirkulationssystem, fig 2.2b, är trycket i själva borrhålet detsamma som det närmast omgivande grundvattentrycket. För att minska eller förhindra konvektionsströmning i borrhålets överdel och därav orsakad värmeförlust, bör dock en avstängning av borrhålet insättas även i ett slutet system.

I fallet slutet cirkulationssystem fås inga vattenförluster från borrhålen. Den hydrauliska kontrollen av cirkulationssystemet blir också bättre än i fallet med ett öppet system. Dessutom undviks kemiska utfällningar i rör och apparatur, eftersom det cirkulerande vattnet ej är i direktkontakt med berget. Å andra sidan innebär ett slutet system sämre värmeöverföringsegenskaper, eftersom det cirkulerande, värmebärande vattnet ej är i direktkontakt med bergytan.

Ett borrhålsmagasin, vars aktiva övre del är ytligt belägen, är som regel endast lämpligt för temperaturer under $+100^{\circ}\text{C}$.

Högre lagringstemperaturer, t ex 120 à 140°C , kan dock användas förutsatt att den aktiva delen av lagret förläggs på större djup. Borrhålen bör då förses med avstängningar i flera steg alternativt igengjutas längs den icke aktiva delen. Fig 2.3.

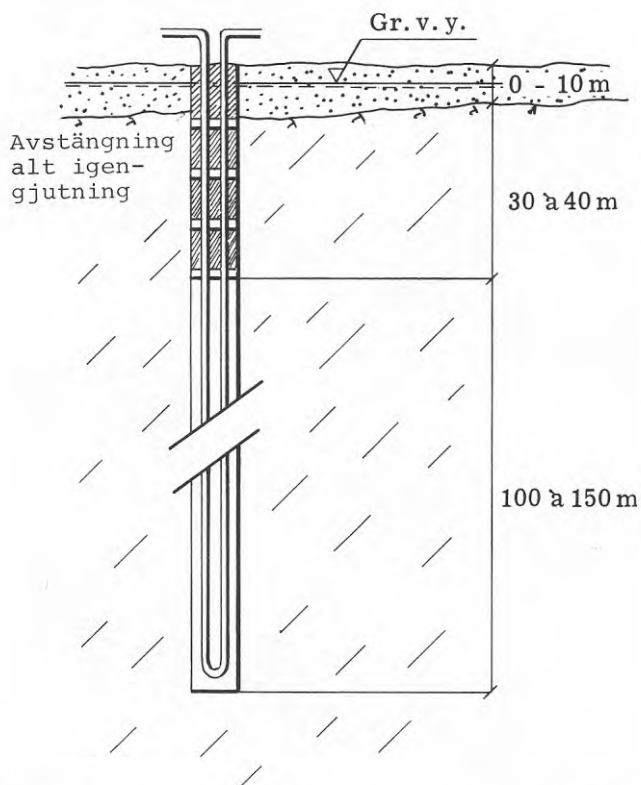


Fig 2.3 Slutet cirkulationssystem för höga lagringstemperaturer

2.2 Driftstrategier

Olika driftstrategier kan tillämpas vid såväl laddning som urladdning. I det enklaste fallet laddas resp urladdas i princip hela lagervolymen samtidigt. Samtliga borrhål genomströmmas då av lika stora flöden med lika temperatur.

Vid en annan strategi, med bättre verkningsgrad, laddas lagret från centrum och radiellt utåt. Urladdning sker i omvänd riktning med start i lagrets perifera delar. I princip innebär detta att borrhålen är seriekopplade och att vattnet leds från borrhål till borrhål i radiell riktning. En praktisk tillämpning av denna strategi kan vara att indela lagret i olika temperaturzoner. Fig 2.4. Härvid kan just de delar av lagret användas som vid varje tillfälle bäst motsvarar uttags- eller laddningssituationen. Genom att lagrets perifera del har lägre temperatur än dess centrala del minskar värmeförlusten från lagret.

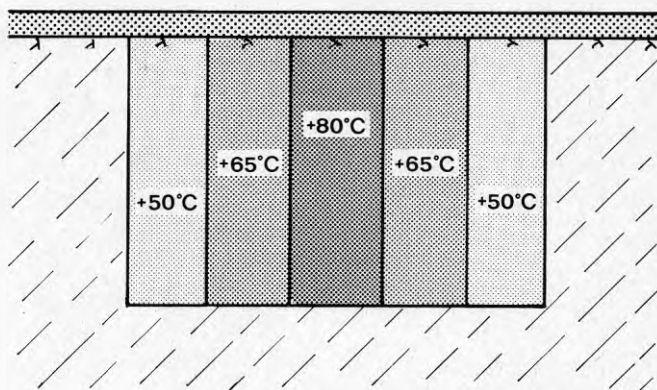


Fig 2.4 Temperaturzoner i cirkulärcylindriskt borrhållager. Principskiss

2.3 Uppbyggnadssystem

Ett borrhålslager kan utformas på många sätt, antingen uppbyggda av endast borrhål eller som kombinationer av utsprängda volymer och borrhål. Fig 2.5 och 2.6.

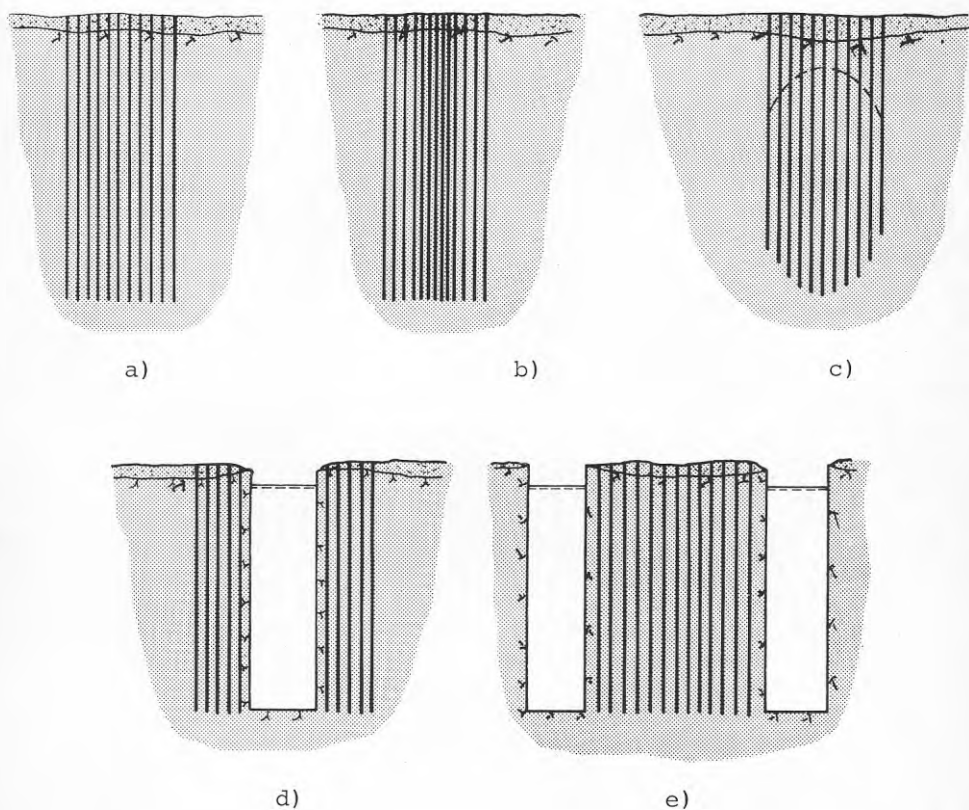


Fig 2.5 Rotationssymmetriska utformningar av borrhålslager

- a) Normalutförande med jämnt fördelade borrhål
- b) Utförande med tätare hålplacering och/eller grövre hål i centrum
- c) Optimal form med hänsyn till värmeförluster
- d) Utsprängt schakt omgivet av borrhål
- e) Borrhål omgivna av utsprängt ringschakt

Utformning enligt d) och e) har föreslagits av Svenska Väg.

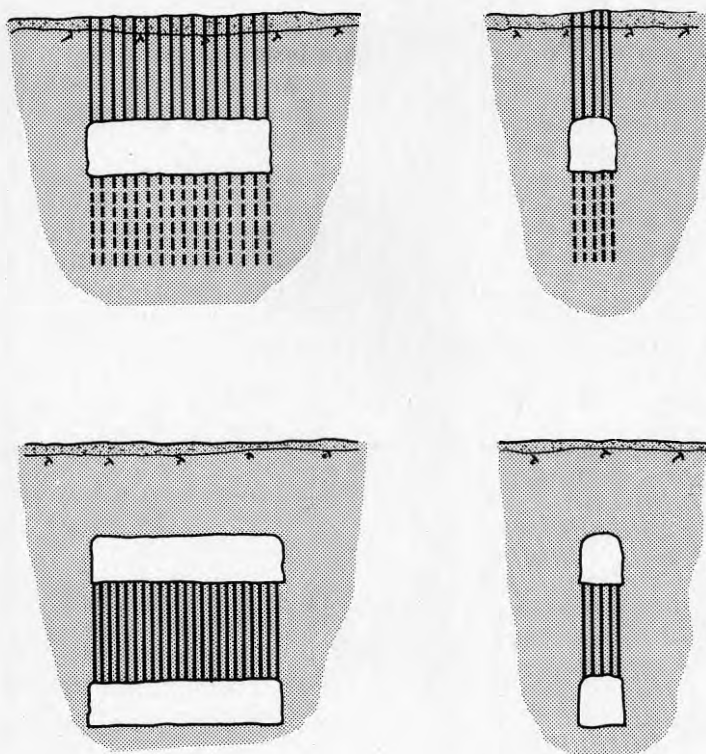


Fig 2.6 Borrhålslager i kombination med utsprängda, vattenfyllda bergrum

Utformningar enl fig 2.5 d-e och enl fig 2.6 torde innebära komplicerade driftstrategier, bl a på grund av stora skillnader i "värmetröghet" mellan berg och vatten. Det förefaller dessutom tveksamt om ett borrhålslager ekonomiskt kan kombineras med utsprängda bergvolymer. Borrhålslagrets kostnad måste i ett sådant fall konkurrera med bergrummets relativt låga marginalkostnad för en utvidgning av rummet.

Som framgår av parameterstudierna i avsnitt 2.6 har lagrets form ringa betydelse med avseende på värmeförlusten vid stor lagervolym. En utformning med arrangemang enligt fig 2.5c torde därför ej vara ekonomiskt motiverad.

Av de skisserade utformningarna synes således i första hand de enligt fig 2.5a och b vara praktiskt tillämpbara. En utformning enligt fig 2.5b, dvs ett borrhåls-lager med ett tätt borrarat centrumparti, medger i första hand en något högre temperaturverkningsgrad. I här redovisad studie har dock endast normalutförandet enligt fig 2.5a behandlats.

2.4 Utformning

Ett borrhålsmagasin för t ex 30 GWh, motsvarande lagringsbehovet för ca 1500 villor, omfattar en bergvolym av storleksordningen 10^6 m^3 . Som framgår av parameterstudierna, avsnitt 2.6, kan ett optimalt hålavstånd anses vara ca 4 m. Mot varje borrhålsmeter svarar då ca 14 m^3 berg. För ovan angivet magasin motsvarar detta ca 70 000 borrhålsmeter. Erforderligt antal borrhål bestäms nu av djupet på lagret. Tre olika djup studeras, 50, 100 respektive 150 m. Fig 2.7.

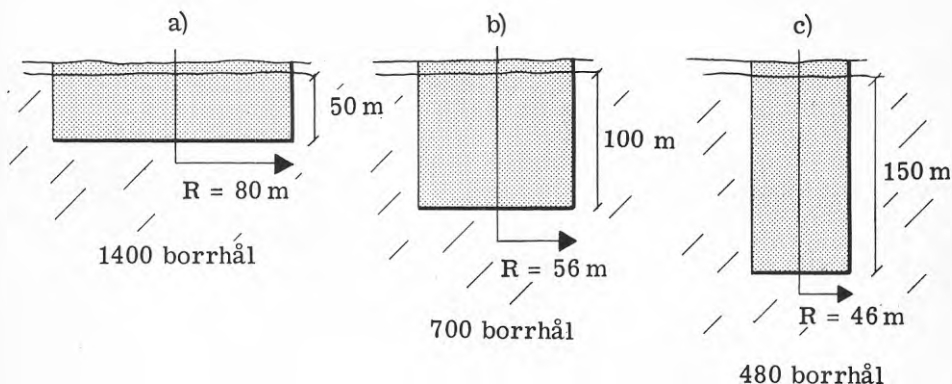


Fig 2.7 Cirkulärcylindriskt borrhålsmagasin, 10^6 m^3 . Hålavstånd 4 m. Varierande höjd och radie.

Magasinets form har vid stora volymer en relativt liten inverkan på värmeförluster och verkningsgrad. Jfr avsnitt 2.6. Formen kan då i stället väljas så att anläggningskostnaden, varav borrhningskostnaden är en väsentlig del, minimeras.

Uppgifter om borrhningskostnader har inhämtats från bl a anläggningsentreprenörer och specialistföretag såsom Stabilator och Tung Geoteknisk Borrhning. Erhållna uppgifter uppvisar en relativt stor spridning. Nedanstående kostnadssammanställning skall därför endast ses som en indikation.

| Håldiameter mm | Borrhningskostnad kr per m vid olika håldjup | | |
|-------------------|---|-------|-------|
| | 50 m | 100 m | 150 m |
| 200 | 140 | 160 | 180 |
| 150 | 105 | 115 | 140 |
| 115 | 80 | 85 | 100 |
| 90 | 55 | 65 | 75 |
| 76 | 50 | 60 | - |

Tabell 2.1 Borrhningskostnad vid olika håldiameter och håldjup. Kostnaderna baseras på en arbetsvolym på ca 70 000 borrhmeter. Kostnadsnivå 1980

Om ett lager med utformning enl fig 2.7 har en jordtäckning skall till kostnaderna läggas jordborrhning med foderrör av stål. För 5 m jordtäckning kan denna kostnad uppskattas till ca 3.300:- per borrhål för håldiameter 200 mm, 2300:- för håldiameter 150 mm och 1500:- för mindre håldiameterar.

Den totala borrhningskostnaden för olika lagerutformningar framgår av tabell 2.2 nedan.

| Håldiameter mm | Total borrhningskostnad i milj kr för olika lagerutformning | | |
|-------------------|--|---------------|---------------|
| | a) djup 50 m | b) djup 100 m | c) djup 150 m |
| 200 | 14,4 | 13,6 | 14,2 |
| 150 | 10,5 | 9,7 | 10,9 |
| 115 | 7,7 | 7,0 | 7,7 |
| 90 | 6,0 | 5,6 | 6,0 |
| 76 | 5,6 | 5,3 | - |

Tabell 2.2 Borrhningskostnad för lagerutformning enl fig 2.7. Kostnaden inkluderar jordborrhning, 5 m, med foderrör av stål. Kostnadsnivå 1980.

Av tabell 2.2 framgår att oavsett vilken borrhålsdiameter som väljs, så får en utformning enl fig 2.7b den lägsta totala borrhålskostnaden. Angivna kostnader är som ovan antytts osäkra. De torde dock kunna motivera att ett borrhålslager av här avsedd storleksordning utformas enl fig 2.7b, dvs med diametern ungefär lika med höjden. En sådan utformning är dessutom med tanke på värmeförlusten den mest gynnsamma.

Borrhålskostnaderna för ett givet håldjup ökar med borrhålsdiametern. En större borrhålsdiameter medger å andra sidan en ökad värmeöverföring mellan berget och vattnet i borrhålet. I sin tur innebär detta att avstånden mellan borrhålen kan göras större då grova borrhål användes. Val av borrhålsdiameter kan därför ses som en ren optimeringsfråga.

2.5 Termiska förlopp

De termiska förloppen i ett borrhålslager och i det omgivande berget är komplicerade. Ett tredimensionellt, dynamiskt temperaturfält uppstår vilket styrs av värmeförlusterna resp värmeuttaget via det i borrhålen strömmande vattnet.

Vid säsongslagring upprepas förloppen i årliga cykler. Transienta förlopp överlagras på dessa under de första åren då omgivande berg uppvärms till stationärt tillstånd.

Termiska förlopp vid rörsystem i mark har behandlats av M Johansson och J Claesson, "Continuous heat source model for ground heat storage", 1979 [5]. De i ovan angivna arbete framtagna beräkningsmodellerna har använts för att studera de termiska förloppen vid ett borrhålsmagasin i berg. Härvid har beräkningarna utgått från ett referensmagasin enligt fig 2.8 och driftdata enligt nedan.

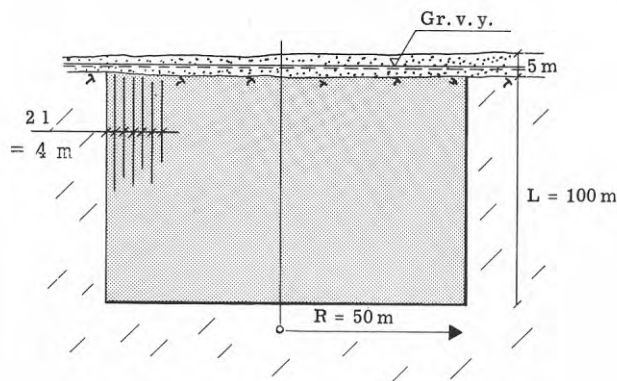


Fig 2.8 Referensmagasin. Cirkulärcylindriskt borrhålslager i granit. 5 m täckande jordlager

Följande driftdata har antagits för referensmagasinet.

Lagringscykel: laddning (3 mån) + vila (3 mån)
+ uttag (3 mån) + vila (3 mån)

Laddnings- och uttagseffekt: $Q_0 = 8 \text{ MW}$ (första laddningscykeln genomförs dock med $2Q_0$)

Högsta laddningstemperatur: $T_i = 90^\circ\text{C}$

Lägst uttags-temperatur: $T_e = 50^\circ\text{C}$

Bergets värmeledningstal: $\lambda = 3,5 \text{ J/m, s, }^\circ\text{C}$

Lagret studeras under antagande av en driftstrategi som innebär att hela lagervolymen laddas respektive urladdas samtidigt. Samtliga borrhål genomströmmas då av lika stora flöden med lika temperatur.

Laddning sker med konstant effekt Q_0 . Under första laddningsperioden laddas med effekten $2Q_0$. Detta har valts för att med tanke på initialuppvärmningsförlusten snabbt få lagret i fortvarighetstillstånd. Vid laddning antages fluidens temperatur T_f ej få överstiga T_i . Om T_f under laddningen når T_i fortsätter laddningen, inte med den konstanta effekten Q_0 utan med $T_f = T_i$.

En motsvarande gräns har satts vid urladdning. När T_f sjunker till T_e fortsätter urladdningen, inte med den konstanta effekten Q_0 utan med $T_f = T_e$ så länge denna temperatur kan upprätthållas.

Laddnings- och urladdningsförloppen för referensmagasinet under de tre första åren framgår av fig 2.9.

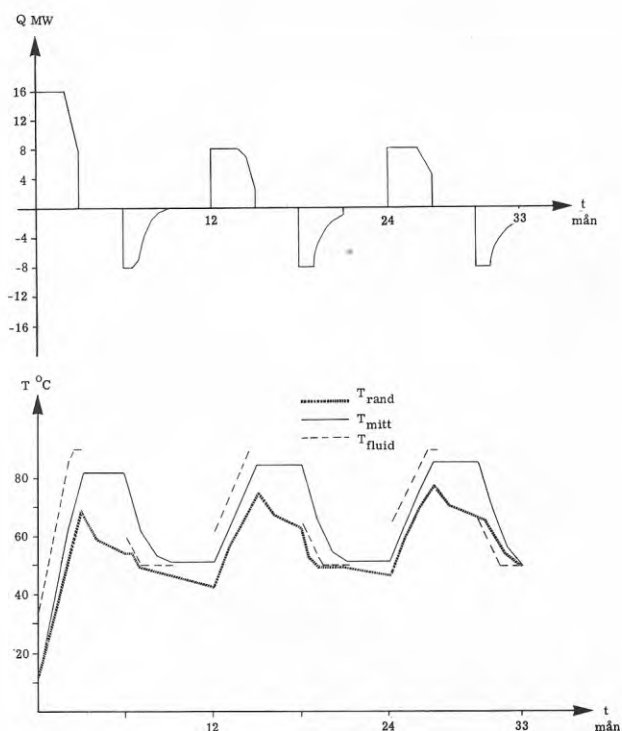


Fig 2.9 Laddnings- och urladdningsförlopp vid ett referensmagasin enl fig 2.8. $T_e \geq 50^\circ\text{C}$

Det övre diagrammet i fig 2.9 visar laddnings- resp urladdningseffekten under de tre första åren. Det undre diagrammet visar dels bergtemperaturen i lagrets centrum och vid dess yttre begränsning på djupet $H/2$, dels fluidens temperatur. Fluidens återges givetvis endast under laddnings- och urladdningsperioderna.

Som framgår av fig 2.9 kan laddningen med $2Q_0 = 16$ MW fortgå under 2 månader. Under denna period värms berget och en allt högre fluid-temperatur erfordras för att bibehålla laddningseffekten $2Q_0$. Då fluid-temperaturen nått den antagna övre gränsen, 90°C , fortsätter laddningen under 1 månad med oförändrad fluid-temperatur men med sjunkande effekt.

Efter en viloperiod på 3 månader urladdas magasinet med konstant effekt $Q_0 = 8$ MW. Efter ungefär 2 veckor har den för urladdningen erforderliga fluid-temperaturen sjunkit till den antagna minimitemperaturen 50°C . Urladdningen fortsätter därefter med konstant fluidtemperatur men med sjunkande effekt. En ny viloperiod inträder sedan efter en total urladdningstid på 3 månader. Cykeln upprepas därefter år efter år, nu med en högsta laddningseffekt $Q_0 = 8$ MW.

Inlagrad och uttagen energi är proportionell mot ytan under resp effekt-tidkurva i fig 2.9. Av diagrammet kan utläsas att verkningsgraden, uttryckt som kvoten mellan uttagen och inlagrad energi uppgår till 65% under år 2 och till 70% under år 3. Verkningsgraden fortsätter därefter att öka och har efter 5 år nästan nått sitt slutliga värde, ca 80%. Jfr fig 2.14.

Referensmagasinet har även studerats för en lägsta uttagstemperatur $T_e = 20^\circ\text{C}$. Övriga data är oförändrade. Laddnings- och urladdningsförloppen framgår av fig 2.10. Den slutliga verkningsgraden kommer i detta fall att uppgå till ca 90%. Jfr fig 2.14.

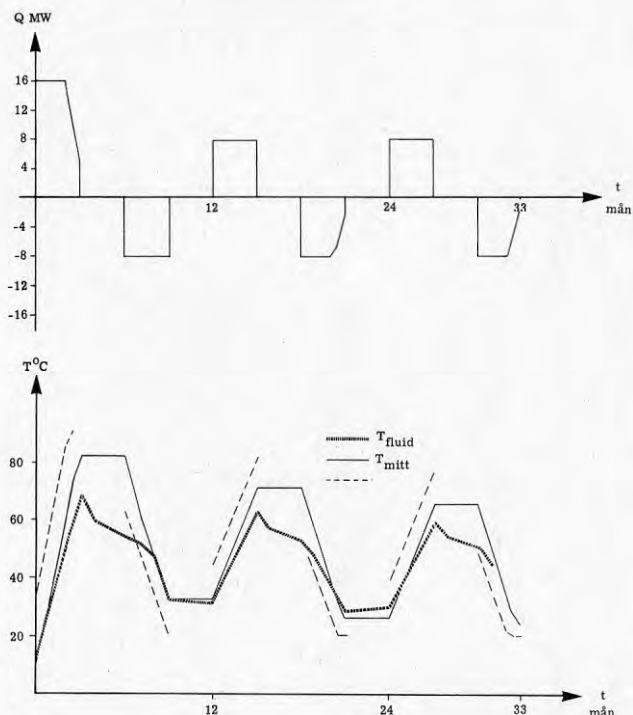


Fig 2.10 Laddnings- och urladdningsförlopp vid ett referensmagasin enl fig 2.8. $T_e \geq 20^\circ\text{C}$

2.6 Parameterstudier

"The continuous heat source model"[5] har använts för att studera inverkan av olika parametrar såsom form, storlek etc. Härvid har det ovan definierade referensmagasinet utnyttjats.

Parameterstudien har relaterats till magasinets prestanda i form av energiverkningsgrad och temperaturverkningsgrad.

Energiverkningsgraden η_Q definieras som kvoten mellan uttagen och inlagrad energi. Temperaturverkningsgraden η_T definieras utgående från en antagen omgivningstemperatur $T_O = 10^\circ\text{C}$ enligt

$$\eta_T = \frac{T_e - T_O}{T_i - T_O}$$

där T_e och T_i är fluidens medeltemperatur under uttag resp inlagring.

I fig 2.11 t o m 2.14 visas energi- och temperaturverkningsgraden som funktion av följande magasinparametrar

- storlek, L , m
- termisk konduktivitet hos berget, λ J/m.s, $^\circ\text{C}$
- form, $2R/L$
- hållavstånd, 2 l, m
- lägsta acceptabla uttagstemperatur, T_e , $^\circ\text{C}$

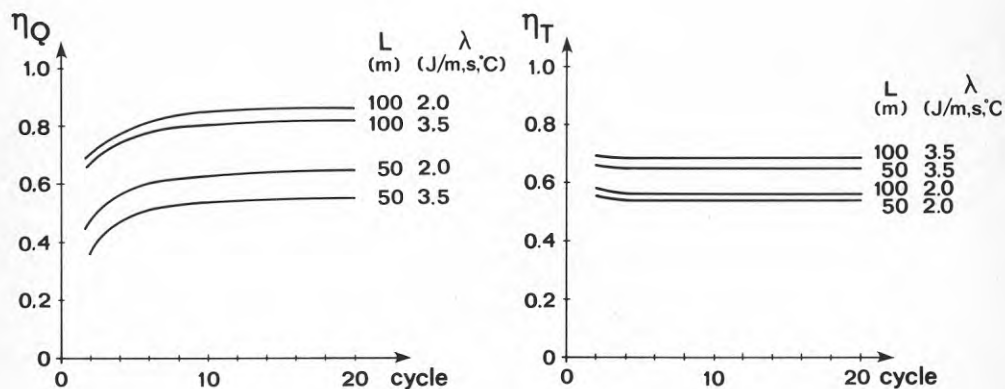


Fig 2.11 Energi- och temperaturverkningsgrad som funktion av magasinstorleken $L=2R$ och bergets värmeledningsförmåga λ .

För storleken $L = 50$ m, svarande mot en volym lika med $1/8$ av referensmagasinets, har verkningsgraderna beräknats utgående från laddnings- och uttagseffekten $Q_0 = 1$ MW.

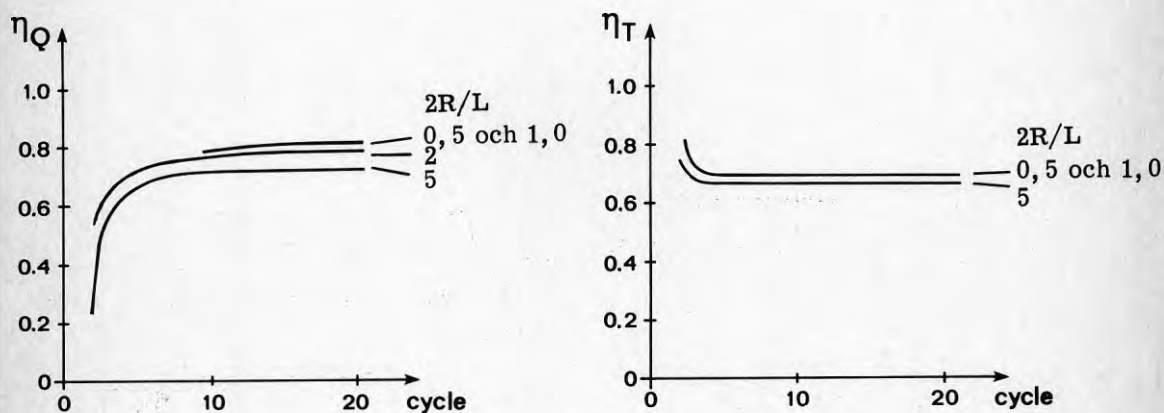


Fig 2.12 Energi- och temperaturverkningsgrad som funktion av magasinets formfaktor $2R/L$.

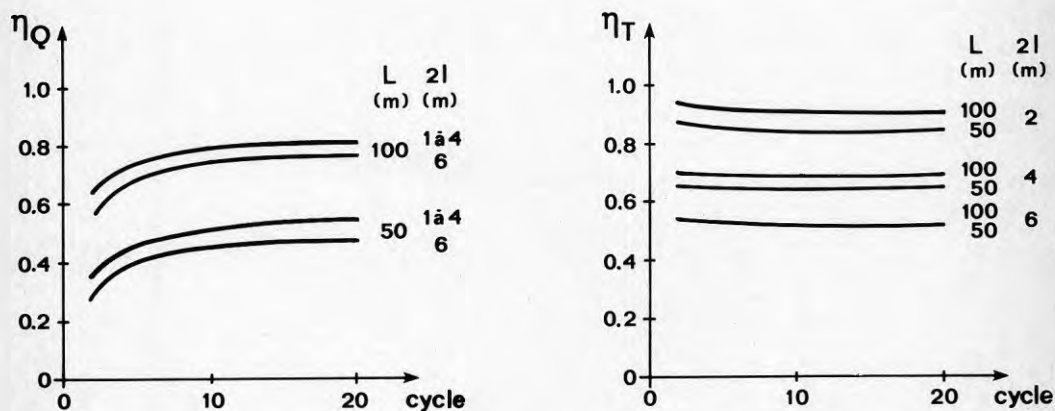


Fig 2.13 Energi- och temperaturverkningsgrad som funktion av magasinets storlek L och hålavstånd $2l$

Avståndet mellan borrhålen är en väsentlig parameter eftersom anläggningskostnaden starkt påverkas av antalet borrhål. Ett ökat hålavstånd innebär enligt fig 2.13 endast en måttlig sänkning av verkningsgraderna. Ett ökat hålavstånd vid oförändrad lagervolym innebär emellertid samtidigt att magasinets laddnings- och uttagskapacitet minskar.

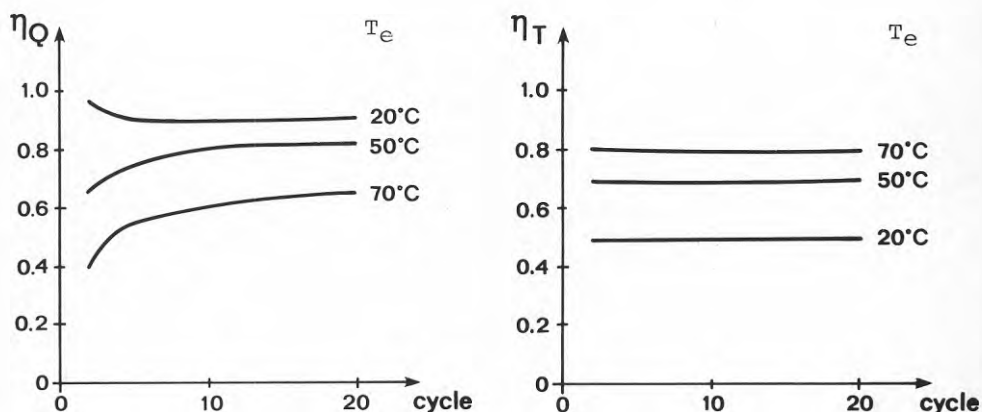


Fig 2.14 Energi- och temperaturverkningsgrad som funktion av uttagstemperaturen T_e . $T_i \leq 90^\circ\text{C}$

3. HYDROGEOLOGISKA FÖRUTSÄTTNINGAR

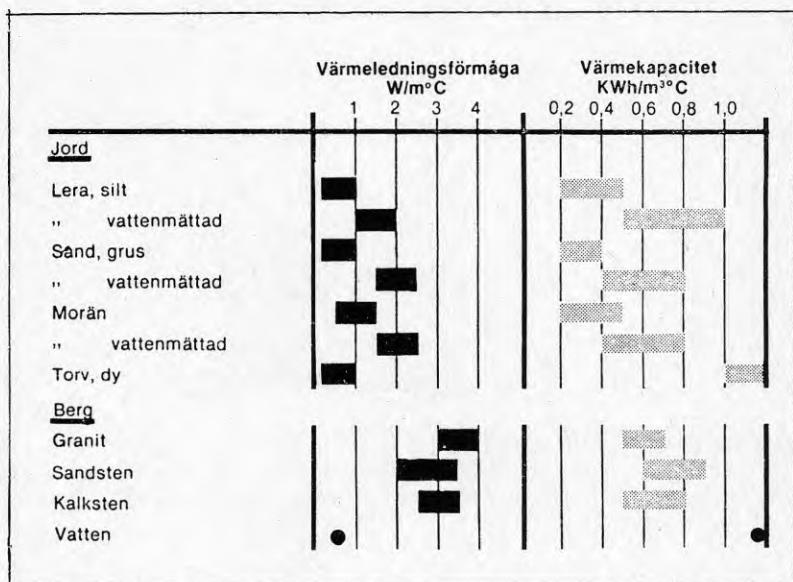
3.1 Allmänt

3.1.1 Berggrund

De allmänna geologiska förhållandena i Sverige med ca 75% av berggrunden bestående av kristallint urberg innebär att borrhålslager skulle kunna anläggas på många platser i landet. Att urberget är speciellt lämpat för ovan beskriven lagringsmetod beror på dess massiva karaktär med mycket låg porositet och dess som regel låga hydrauliska konduktivitet.

Borrhålslager kan även tänkas utförbara i sedimentära bergarter med låg hydraulisk konduktivitet. Den lägre värmeledningsförmågan för sedimentära bergarter medför dock att borrhålen måste placeras tätare. En förutsättning är också att lagerföljden inte växlar och att borrhålen kan utföras utan fördyrande inklädnader.

Värmeledningsförmåga och värmelagringsförmåga för några olika jord- och bergarter framgår av nedanstående sammanställning.



Tabell 3.1 Sammanställning av värmeledningsförmåga och värmekapacitet för olika material

3.1.2 Jordlager

Mäktiga jordlager är en fördyrande faktor vid utförande av ett borrhållslager. Ett täckande jordlager innebär dock samtidigt en värmeisolering. Parameterstudier indikerar att borrhållslagrets verkningsgrad märkbart ökar med ökande mäktighet hos jordlagret [5]. Vid jordlager mäktigare än ca 10 m avtager dock snabbt den verkningsgradshöjande inverkan.

Jordlagrets mäktighet varierar från region till region. Områden med sedimentbergarter i Skåne, västra Blekinge och södra Halland har jordmäktigheter mellan 15 till 100 m, medan jordlagren på Öland och Gotland som regel har en mäktighet på mellan 0 - 10 m.

Södra Sveriges urberg till linjen Gävle - Strömstad har som regel ett tunnare jordtäckte (0 - 15 m) än landet norr därom med jordmäktigheter mellan 10 - 30 m.

Många städer i södra Sverige har dock betydande jordlagermäktigheter, t.ex. Jönköping, Göteborg, Kungsbacka, Norrköping, Värnamo m.fl. där jorddjup på 50 - 100 m påträffas.

Allmänt kan sägas att städernas centrala delar vilka ofta ligger kring ett vattendrag har större jordmäktigheter än förortsområden vilka ofta ligger på dalsidor eller i mer bergiga områden.

Genom berggrundens nivåvariationer går dock berg ofta idagen även i städer med stora jordmäktigheter t.ex. Göteborg, Kungsbacka, Norrköping m.fl.

3.1.3 Grundvatten

Grundvattenytan ligger i urbergsområdena som regel endast några meter till ett 10-tal meter under markytan. I starkt kuperad terräng kan grundvattenytan dock lokalt ligga lägre.

I tätortsområden påverkas grundvattenytan ofta av bergtunnlar och andra undermarksarbeten. Som regel är dock undermarksanläggningarna ytligt belägna, varför avsänkningen oftast är mindre än 10 - 15 m. Många mindre tätorter och stora områden i de större tätorterna saknar berganläggningar och där är grundvattenytan i det närmaste opåverkad.

Den hydrauliska kapaciteten eller enklare uttryckt bergets vattenförande egenskaper varierar också från region till region. Detta beror på bergartsvariationer och variationer i tektonisk påverkan vilket lett till olika uppspruckenhet hos berget i olika områden.

De regionala variationerna i vattenförande egenskaper har av olika författare utvärderats med hjälp av tillgänglig brunnborrningsstatistik. C-G Wenner 1951 [6] O. Mejer och B. Sund 1952 [7] och Sveriges Geologiska Undersökning (SGU) 1977 [8].

I enlighet med en särskild lag SFS 1975:424 insändes fortlöpande brunnborrningsresultat till SGU. Bearbetningen av detta material presenteras i form av regionala översikter och som specialkartor vid den hydrogeologiska karteringen.

Beräkningen av transmissivitet och permeabilitet för olika regioner med ledning av brunnborrningsdata har utförts av L. Carlsten och A. Carlstedt, 1976 [9] och A. Carlsson och T. Olsson 1977 [10].

Ytberget har konstaterats vara väsentligt genomsläppligare, varför man i vissa fall får tänka sig att det ytligaste berget ner till ca 30 m djup ej trycksättes. Vid öppna system kan borrhålet förslutas på denna nivå så att cirkulationen endast sker på lägre nivå. Alternativt utnyttjas slutna system.

3.1.4 Vattenkemi

En annan geologisk faktor av betydelse för ett borrhålslager med öppet system är vattenkvaliteten hos cirkulationsvattnet.

Av mineralen i bergmaterialet är det kvarts och karbonater som främst kan ge problem vid de temperaturer det här är fråga om.

Karbonatbergarter är relativt sällsynta i urberget. Karbonater förekommer dock som sprickmineral men i liten omfattning.

För de flesta mineral är en ökad utlösning att vänta med ökande tryck och temperatur. Undantag utgör karbonater.

Försök i grå Stockholmsgranit i ett 20 m djupt horisontellt borrhål \varnothing 300 mm där uppvärmning skedde i cykler med Mälarvatten visar att vattnet ganska snabbt fick en beskaffenhet närmande sig berggrundsvattnets. Små kemiska förändringar skedde under uppvärmningscykler upp till 100°C men en påtaglig förändring vid 110°C. S Bjurström m fl 1977 [11].

Försök rapporterade av Claesson-Ronge 1979/80 [12] i autoklav med 150°C vatten visar hög utlakning för saltvatten.

Vittring och utfällning på mineralytor i borrhålen skulle kunna minska värmeöverföringen mellan vatten och berg. Troligt är att dessa processer ej har någon större omfattning eller betydelse under 100°C.

Även i värmeväxlare kan utfällningsproblem uppstå vilket med jämna mellanrum kräver rengöring av värmeväxlarytorna.

3.1.5 Temperaturförhållanden

De årliga klimatiska temperaturvariationerna avklingar vågformigt mot djupet i jord och i berg. I områden med blottat berg eller tunt jordtäckte kan temperaturvariationerna i kristallint urberg följas till 15-20 m djup. Från denna nivå stiger temperaturen tämligen konstant. Räknat från markytan till 100 m djup ökar temperaturen mellan 0,5-1,5°C.

Medeltemperaturen från markytan till djupet 100 m i den kristallina berggrunden stiger från 2-3°C i norra Lappland till 8-9°C i södra Sverige.

3.2 Bergets vattengenomsläpplighet

3.2.1 Orientering

Ett borrhålslayers funktion bygger i första hand på värmeledning i själva berget. Vattenströmning i sprickor genom eller inom lagret innebär förluster eller påverkan på temperaturfördelningen inom lagret.

Då ett borrhålslager utförs med ej infodrade, trycksatta hål, dvs som "öppet system", är bergets täthet en avgörande faktor för lagrets funktion. Borrhålslagret kan också utföras som "slutet system", dvs med i princip U-formiga rör nedsänkta i borrhålen. I berget sker i ett sådant fall endast den naturliga grundvattenströmningen.

Den högsta acceptabla vattengenomsläppligheten eller genomströmningen är beroende av bl.a. lagerstorlek och temperaturområde. Det är därför av intresse att allmänt studera berggrundens vattengenomsläpplighet.

3.2.2 Hydraulisk konduktivitet

En vätska antages strömma genom ett poröst material. Vätskans hastighet och porernas tvärdimension antages små. Vätskans rörelse är då laminär och DARCY's lag gäller

$$q = K \cdot I \quad (1)$$

där q = vätskeflödet i m^3/s per m^2 total tvärsnittsarea, (genom såväl porer som fast material), vinkelrätt mot strömningen

K = det porösa materialets hydrauliska konduktivitet, $m^3/s, m^2$

I = hydrauliska gradienten m/m

Den hydrauliska konduktiviteten, K , är en koefficient vars värde bestäms av det porösa materialets och den strömmande vätskans egenskaper. Dessa kan särskiljas genom uttrycket

$$K = k \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \quad (2)$$

där k = det porösa materialets permeabilitet, m^2

ρ = vätskans densitet, kg/m^3

μ = vätskans dynamiska viskositet, Ns/m^2

g = tyngdkraftens acceleration, m/s^2

Vätskans densitet, ρ , och viskositet, μ , beror av bl.a. vätskans temperatur, T. För rent vatten vid atmosfärstryck gäller angivna värden i tabell 3.2

| T (°C) | ρ | $\mu \cdot 10^6$ | T (°C) | ρ | $\mu \cdot 10^6$ |
|--------|--------|------------------|--------|--------|------------------|
| 0 | 999,8 | 1787 | 50 | 988,2 | 547 |
| 5 | 1000,0 | 1519 | 55 | 985,7 | 504 |
| 10 | 999,8 | 1307 | 60 | 983,2 | 467 |
| 15 | 999,2 | 1139 | 65 | 980,5 | 434 |
| 20 | 998,3 | 1002 | 70 | 977,7 | 404 |
| 25 | 997,1 | 890 | 75 | 974,8 | 378 |
| 30 | 995,7 | 798 | 80 | 971,6 | 355 |
| 35 | 994,0 | 719 | 85 | 968,4 | 334 |
| 40 | 992,3 | 653 | 90 | 965,2 | 315 |
| 45 | 990,2 | 596 | 95 | 961,6 | 298 |

Tabell 3.2 Vattnets densitet, ρ , och viskositet, μ , vid olika temperaturer, T.

Permeabiliteten, k, beror enbart av det porösa materialets egenskaper och då främst porernas storlek och form. På grund av att porerna deformeras om det porösa materialet deformeras kan spänningstillståndet i materialet och därför även materialets temperatur och vätskans tryck ha inverkan på permeabiliteten. Värdet på permeabiliteten är oberoende av vilken vätska som rinner fram genom materialet.

En bergmassas vattengenomsläpplighet beror av de sprickor och porer som finns i berget. I kristallina bergarter, såsom t.ex. granit och gnejs, finns dels mikrosprickor mellan bergartskristallerna, dels makrosprickor mellan de bergblock som bergmassan vanligen är uppdelad i.

I sedimentära bergarter, såsom t.ex. sandsten, finns dels fina porer mellan sedimentkornen, dels oftast makrosprickor mellan bergblock.

I kristallina bergarter är vanligen vattengenomsläppligheten hos en bergmassa helt beroende av de makrosprickor som i olika riktningar genomkorsar bergmassan. Mikrosprickorna bjuder så stort motstånd mot vattenströmning att bergblocken mellan makrosprickorna i dessa sammanhang kan betraktas som vattentäta.

Tabellerna 3.3 och 3.4 visar värden på hydrauliska konduktiviteten, K , som anges av LOUIS 1967 [13] resp STAGG and ZIENKIEWICZ 1968 [14]. Värdena (som avser vatten som strömmande vätska) kommer från dels laboratiemätningar på bergartsstycken utan makrosprickor, dels fältmätningar i berg som innehåller makrosprickor. T.ex. anger tabellerna för bergartsstycken av icke vittrad granit en hydraulisk konduktivitet av storleksordningen $K = 10^{-10}$ cm/s, dvs $K = 10^{-12}$ m/s. För bergmassan med sina makrosprickor anges för granit och gneis storleksordningen $K = 10^{-3}$ cm/s dvs $K = 10^{-5}$ m/s. Bergmassan med sina makrosprickor har således storleksordningen 10^7 gånger så stor vattengenomsläpplighet som själva bergarten.

| Bergart | K_G (cm/s) | Tjocklek $2a_i$ (mm) | K_F (cm/s) i sprickans riktning |
|----------|----------------------------|-------------------------|---|
| Sandsten | $0,29 - 6 \cdot 10^{-11}$ | 0,2 | $0,6 \cdot 10^{-3}$ |
| Granit | $0,5 - 2,0 \cdot 10^{-10}$ | 2,0 | 0,6 |
| Skiffer | $0,7 - 1,6 \cdot 10^{-10}$ | 4,0 | $0,5 \cdot 10^1$ |
| Kalksten | $0,7 - 120 \cdot 10^{-9}$ | | |
| Dolomit | $0,5 - 1,2 \cdot 10^{-8}$ | 6,0 | $1,6 \cdot 10^1$ |

Tabell 3.3 Hydraulisk konduktivitet hos bergartsstycken utan makrosprickor (vänstra tabellen) samt teoretiskt beräknade värden på hydrauliska konduktiviteten hos en bergmassa som innehåller en serie parallella och släta makrosprickor med tjockleken $2a_i$ mm på ett inbördes avstånd av 1 m (högra tabellen). Källa: LOUIS 1967.

| Rock material | k (cm/s) (lab. determination) |
|---|--|
| Sandstone ¹⁰ (Cretaceous flysch) | 10^{-8} to 10^{-10} |
| Siltstone ¹⁰ (Cretaceous flysch) | 10^{-8} to 10^{-9} |
| Granite ¹¹ | 5×10^{-11} to 2×10^{-10} |
| Slate ¹¹ | 7×10^{-11} to 1.6×10^{-10} |
| Breccia ¹¹ | 4.6×10^{-10} |
| Calcite ¹¹ | 7×10^{-10} to 9.3×10^{-8} |
| Limestone ¹¹ | 7×10^{-10} to 1.2×10^{-7} |
| Dolomite ¹¹ | 4.6×10^{-9} to 1.2×10^{-8} |
| Sandstone ¹¹ | 1.6×10^{-7} to 1.2×10^{-5} |
| Hard mudstone ¹² | 6×10^{-7} to 2×10^{-6} |
| Black schists ¹² (fissured) | 10^{-4} to 3×10^{-4} |
| Fine-grained sandstone ¹³ | 2×10^{-7} |
| Oolitic rock ¹³ | 1.3×10^{-6} |
| Bradford sandstone ¹ | 2.2×10^{-5} to 6×10^{-7} |
| Glenrose sandstone ¹ | 1.5×10^{-3} to 1.3×10^{-4} |
| Altered granite ¹⁴ | 0.6 to 1.5×10^{-5} |

| Rock mass | (<i>in situ</i> determinations) |
|--|---|
| Arterite migmatites ¹⁰ | 3.3×10^{-3} |
| Chloritized arterites and shales ¹⁰ | 0.7×10^{-2} |
| Gneiss ¹⁰ | 1.2×10^{-3} to 1.9×10^{-3} |
| Pegmatoid granite ¹⁰ | 0.6×10^{-3} |
| Lignite layer ¹⁵ | 1.7×10^{-2} to 23.9×10^{-2} |
| Sandstone ⁹ | 10^{-2} |
| Mudstone ⁹ | 10^{-4} |
| Oocene limestone ¹⁴ | 10^{-2} to 10^{-4} |
| 1 Lugeon unit ¹⁶ | 1 to 2×10^{-5} s |
| Impervious rock ² with 0.1 mm wide joints spaced at 1 metre intervals | 0.8×10^{-4} s |

Tabell 3.4 Hydraulisk konduktivitet hos bergartsstycken utan makrosprickor och bergmassor med makrosprickor. Källa: STAGG and ZIENKIEWICZ 1968 [14]

Permeabiliteten kan ändras vid ändrad temperatur hos det porösa materialet. Det fasta materialets volym ändras med ändrad temperatur, vilket medför ändrad porvolym och porstorlek. Om t.ex. de fasta bergblocken i en sprickig bergmassa får ökad temperatur kommer de att utvidga sig, vilket medför ökade spänningar i bergmassan. De ökade spänningarna medför deformationer i kontaktpunkterna mellan bergblocken och som följd därav minskade sprickvidder och minskad permeabilitet hos bergmassan.

För att få en uppfattning om makrosprickornas vatten-genomsläpplighet betraktas först en jämntjock spricka mellan två plana, parallella och släta sprickväggar. Om sprickvidden, t , är liten blir vattnets rörelse laminär. Då gäller att vattnets medelhastighet i ett tvärsnitt över sprickan är, jfr LOUIS 1967, [13] SNOW 1968 [15].

$$v_n = \frac{t^2}{12} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot I \quad (3)$$

Flödet per breddmeter i sprickan är

$$v_n \cdot t = \frac{t^3}{12} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot I \quad (4)$$

Om berget innehåller ett antal parallella sprickor med ett genomsnittligt avstånd, d , blir vattenflödet per m^2 berg

$$q = \frac{v_n \cdot t}{d} = \frac{t^3}{12d} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot I \quad (5)$$

Värdet på bergmassans permeabilitet, k , är således vid jämntjocka och släta sprickor i en riktning, jfr ekv (2) och (5)

$$k_1 = \frac{t^3}{12d} \quad (6)$$

För att få en uppfattning om inverkan av sprickor i olika riktningar betraktar SNOW 1968 en enkel modell med ekvidistanta, jämntjocka och släta sprickor i tre inbördes vinkelräta riktningar. Vattenströmmen antas, som ett genomsnitt, ha en sådan riktning att den går fram i endast två av sprickriktningarna. Vattenflödet blir då dubbelt så stort som vid sprickor i endast en riktning och således bergmassans permeabilitet

$$k_2 = 2k_1 = \frac{t^3}{6d} \quad (7)$$

Vid olika sprickvidder, t , och ett genomsnittligt sprickavstånd $d = 1,0$ m fås med ekv (7) och (2) följande värden på bergets permeabilitet och hydrauliska konduktivitet

| t (mm) | k (m ²) | K (m ³ /s,m ²) |
|--------|----------------------|---------------------------------------|
| 0,01 | $8,3 \cdot 10^{-17}$ | $6,2 \cdot 10^{-10}$ |
| 0,05 | $1,0 \cdot 10^{-14}$ | $7,8 \cdot 10^{-8}$ |
| 0,1 | $8,3 \cdot 10^{-14}$ | $6,2 \cdot 10^{-7}$ |
| 0,2 | $6,7 \cdot 10^{-13}$ | $5,0 \cdot 10^{-6}$ |
| 0,5 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $7,8 \cdot 10^{-5}$ |
| 1,0 | $8,3 \cdot 10^{-11}$ | $6,2 \cdot 10^{-4}$ |

Tabell 3.5 Permeabilitet och hydraulisk konduktivitet vid T = 10°C

Bergets vattengenomsläpplighet blir mindre om sprickväggarna är skrovliga. Enligt LOUIS 1967 [13] skall då bergets permeabilitet enligt ekv (6) och (7) divideras med faktorn

$$\left[1 + 3,1 \cdot \left(\frac{e}{t} \right)^{1,5} \right] \quad (8)$$

där e = höjden hos skrovlighetselementen på sprickväggarna.

Enligt LOUIS 1967 är ett troligt värde på e i naturliga bergsprickor 0,8 t ä 1,0 t. Faktorn i ekv (8) får då värdet 3,2 ä 4,1, dvs bergets permeabilitet och hydrauliska konduktivitet blir 1/3 ä 1/4 av de värden som gäller vid släta sprickväggar.

Vid stor spricktjocklek och hög vattenhastighet blir vattnets rörelse turbulent. Detta bestäms av värdet på REYNOLD's tal

$$Re = \frac{\rho}{\mu} \cdot v_n \cdot 2t \quad (9)$$

Om sprickorna har släta väggar är vattnets rörelse laminär om $Re < 2300$ och turbulent om $Re > 2300$. Om sprickväggarna är skrovliga kan gränsvärdet mellan laminär och turbulent rörelse ligga så lågt som $Re = 500$, jfr LOUIS 1967 [13].

Enligt ekv (3) och (9) fås

$$Re = \left(\frac{\rho}{\mu} \right)^2 \cdot \frac{g}{6} \cdot t^3 \cdot I \quad (10)$$

Om hydrauliska gradienten är t.ex. $I = 0,01$ och vattnets temperatur $T = 10^{\circ}\text{C}$ fås följande värden på Re vid olika sprickvidder t , tabell 3.6

| | | | | |
|----------|--------|------|-----|------|
| t (mm) | 0,1 | 0,5 | 1,0 | 5 |
| Re | 0,0095 | 1,19 | 9,5 | 1190 |

Tabell 3.6 Reynold's tal som funktion av sprickvidden t . Hydrauliska gradienten $I = 0,01$.

Av tabellen 3.6 framgår att laminär strömning i praktiken råder åtminstone i alla sprickor med mindre sprickvidd än ca 1 mm.

För turbulent strömning i släta eller skrovliga sprickor finns ekvationer angivna av LOUIS 1967 [13].

Om sprickorna i berget är fyllda med krossmaterial, lera etc, bestäms vattengenomsläppligheten huvudsakligen av sprickfyllnadens egenskaper.

Hos kristallint berg varierar ofta den hydrauliska konduktiviteten med djupet under bergytan. Konduktiviteten är störst nära bergytan och minskar sedan med djupet. Detta beror på att sprickfrekvensen och sprickvidderna är större nära bergytan än på större djup. Detta har bekräftats av många mätningar i Sverige och utomlands. Många gånger har dock observerats en jämnare fördelning av den hydrauliska konduktiviteten. Speciellt bör observeras att markanta slag och krosszoner med hög konduktivitet kan sträcka sig till avsevärda djup.

I Sverige har omfattande mätningar av den hydrauliska konduktiviteten hos kristallint berg gjorts inom bl.a. projektet Kärnbränslesäkerhet, KBS, [16] och av Statens Vattenfallsverk [10]. Den hydrauliska konduktiviteten har då bestämts genom vattenförlustmätning i borrhål. Som exempel visas resultat från Vattenfalls mätningar, fig 3.1 och 3.2.

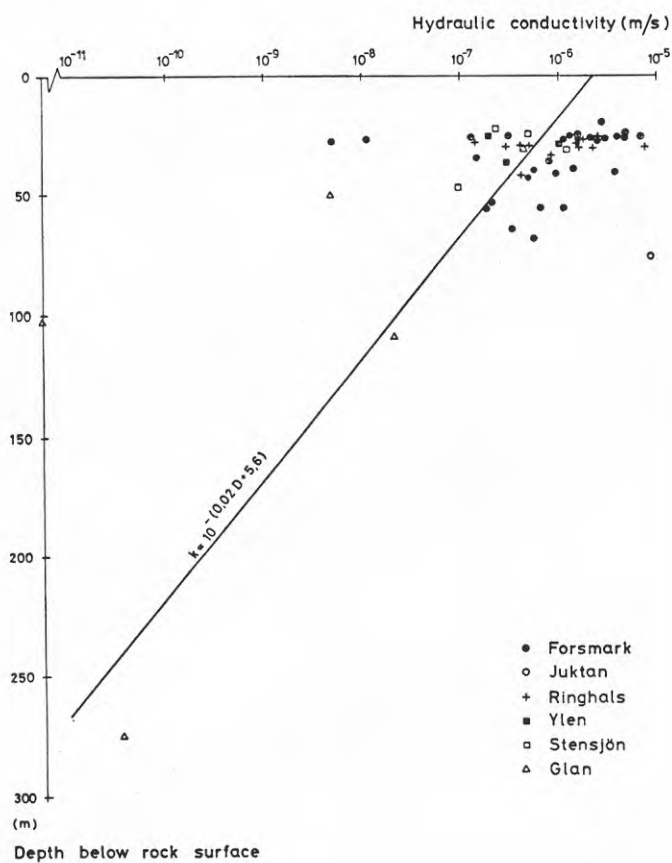


Fig. 3.1 Hydrauliska konduktivitetens medelvärde för borrhål med olika djup under bergytan, [10].

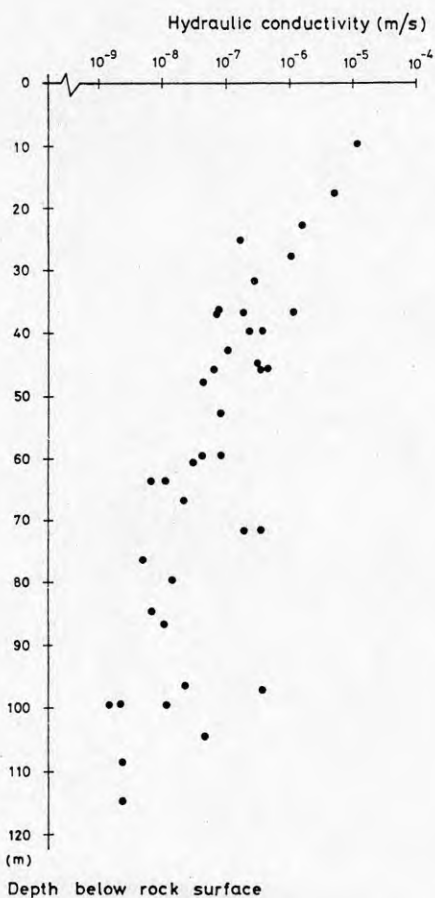


Fig. 3.2 Värden på hydraulisk konduktivitet som beräknats på data från 39 brunnar i berg inom området kring Forsmark och Östhammar. Hydrauliska konduktiviteten är visad som funktion av brunnarnas djup, [10].

För värmelagring i ett borrhålslager är det främst berget ner till 100 å 150 m djup som är av intresse. Av fig. 3.1 - 3.2 framgår att värden på hydrauliska konduktiviteten mellan $K = 10^{-5}$ m/s och $K = 10^{-8}$ å 10^{-9} m/s då är aktuella. Närmast bergytan är konduktiviteten ofta $K = 10^{-6}$ å 10^{-5} m/s. På 100 till 150 m djup är konduktiviteten ofta mindre, men i flera av KBS borrhål uppmättes även på detta djup värden mellan $K = 10^{-6}$ och 10^{-5} m/s. I enstaka fall uppmättes även nära bergytan mycket låga konduktivitetvärden.

Med utgångspunkt från amerikanska vatteninpressningsförsök i borrhål beräknade SNOW 1968[15] genomsnittliga sprickavstånd och sprickvidder på olika djup under bergytan. Resultaten framgår av fig. 3.3 och 3.4.

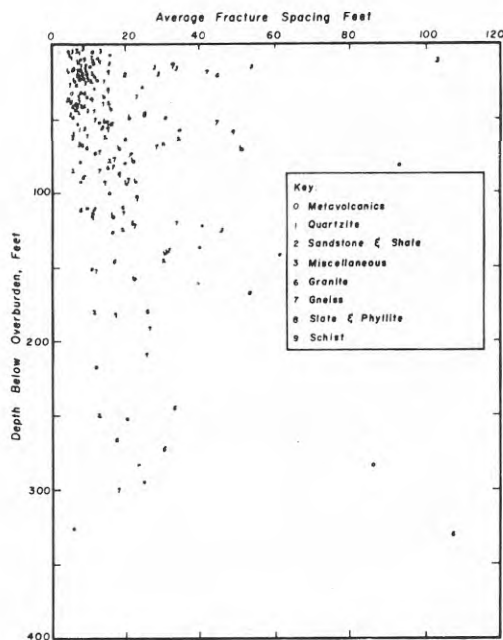


Fig. 3.3 Genomsnittliga sprickavstånd (i fot) vid olika djup under bergytan,[15].

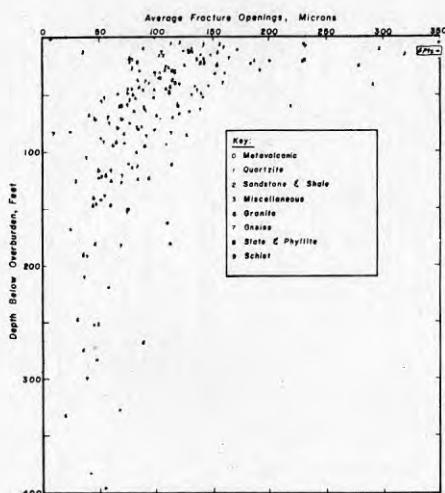


Fig. 3.4 Genomsnittliga sprickvidder (i 1000-dels mm) vid olika djup under bergytan [15]

Av fig. 3.3 framgår att sprickavstånden ökar från i medeltal ca 3 m nära bergytan till i medeltal ca 6 m på djupet 90 m. Samtidigt minskar, enligt fig. 3.4, sprickvidderna kraftigt från i medeltal ca 0,15 mm nära bergytan till i medeltal ca 0,05 mm på djupet 90 m. De nämnda sprickavstånden och sprickvidderna svarar enligt ekv (2) och (7) och vid vattentemperaturen $T = 10^{\circ}\text{C}$ mot en hydraulisk konduktivitet $K = 1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s nära bergytan och $K = 2,8 \cdot 10^{-8}$ m/s på djupet 90 m. Dessa konduktivitetsvärden är av samma storleksordning som ovan relaterats från svenska mätningar. Som framgår av fig. 3.3 och 3.4 är på alla djup under bergytan spridningen stor mellan de sprickavstånd och sprickvidder som uppmätts på olika mätstationer och i olika bergarter. Detta svarar mot stora variationer i hydraulisk konduktivitet. Om sprickvidden ökar med en faktor 2 ökar den hydrauliska konduktiviteten med faktorn 8, jfr ekv (6) och (7).

3.2.3 Naturligt grundvattenflöde

Grundvattnet i bergets sprickor utgöres av nederbörds-vatten som infiltrerat vid bergytan. Grundvattnets strömning bestäms av den fria grundvattenytans nivå-förhållanden. Ofta varierar grundvattenytans nivå på samma sätt som markytans nivå. Höjdparter i terrängen blir då infiltrationsområden från vilka grundvattnet strömmar mot lägre belägna partier där grundvattnet exfiltrerar till markytan, diken, sjöar e dyl. Ström-ningsförhållandena framgår i princip av fig. 3.5 som visar resultat av potentialteoretiska beräkningar som utförts för projekt Kärnbränslesäkerhet[17].

Storleken av grundvattenflödet, q , i berget beror en-ligt ekv (1) av dels bergets hydrauliska konduktivitet, K , dels hydrauliska gradienten, I . Hydrauliska konduk-tiviteten har tidigare diskuterats ovan. Hydrauliska gradienten kan i allmänhet inte överstiga markytans lutning, ofta är den mindre än denna lutning. Det synes rimligt att här antaga att ett värmelager i berg inte förläggs på en plats där den hydrauliska gradienten är större än $I = 0,01$. För några olika värden på bergets hydrauliska konduktivitet, K , fås då följande maximala grundvattenflöden, q , per m^2 tvärsnittsytta i berget.

| K ($m^3/s, m^2$) | 10^{-4} | 10^{-5} | 10^{-6} | 10^{-7} | 10^{-8} | 10^{-9} |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| q ($m^3/s, m^2$) | 10^{-6} | 10^{-7} | 10^{-8} | 10^{-9} | 10^{-10} | 10^{-11} |
| $m^3/år, m^2$ | 31,5 | 3,15 | | | | |
| $l/år, m^2$ | | | 315 | 31,5 | 3,15 | 0,315 |

Tabell 3.7 Grundvattenflöde per m^2 tvärsnittsytta i ber-get vid olika hydraulisk konduktivitet.
Hydrauliska gradienten $I = 0,01$.

Som tidigare nämnts är bergets hydrauliska konduktivitet ofta av storleksordningen $K = 10^{-5}$ à 10^{-6} m/s nära berg-ytan och $K = 10^{-5}$ à 10^{-9} m/s på 100 - 150 m djup.

För ett värmelager som har diametern 100 m och djupet 100 m, dvs tvärsnittsytan $10^4 m^2$ i ett vertikalt plan, fås följande totala grundvattenflöden genom lagret vid hydrauliska gradienten $I = 0,01$ och olika värden på bergets hydrauliska konduktivitet

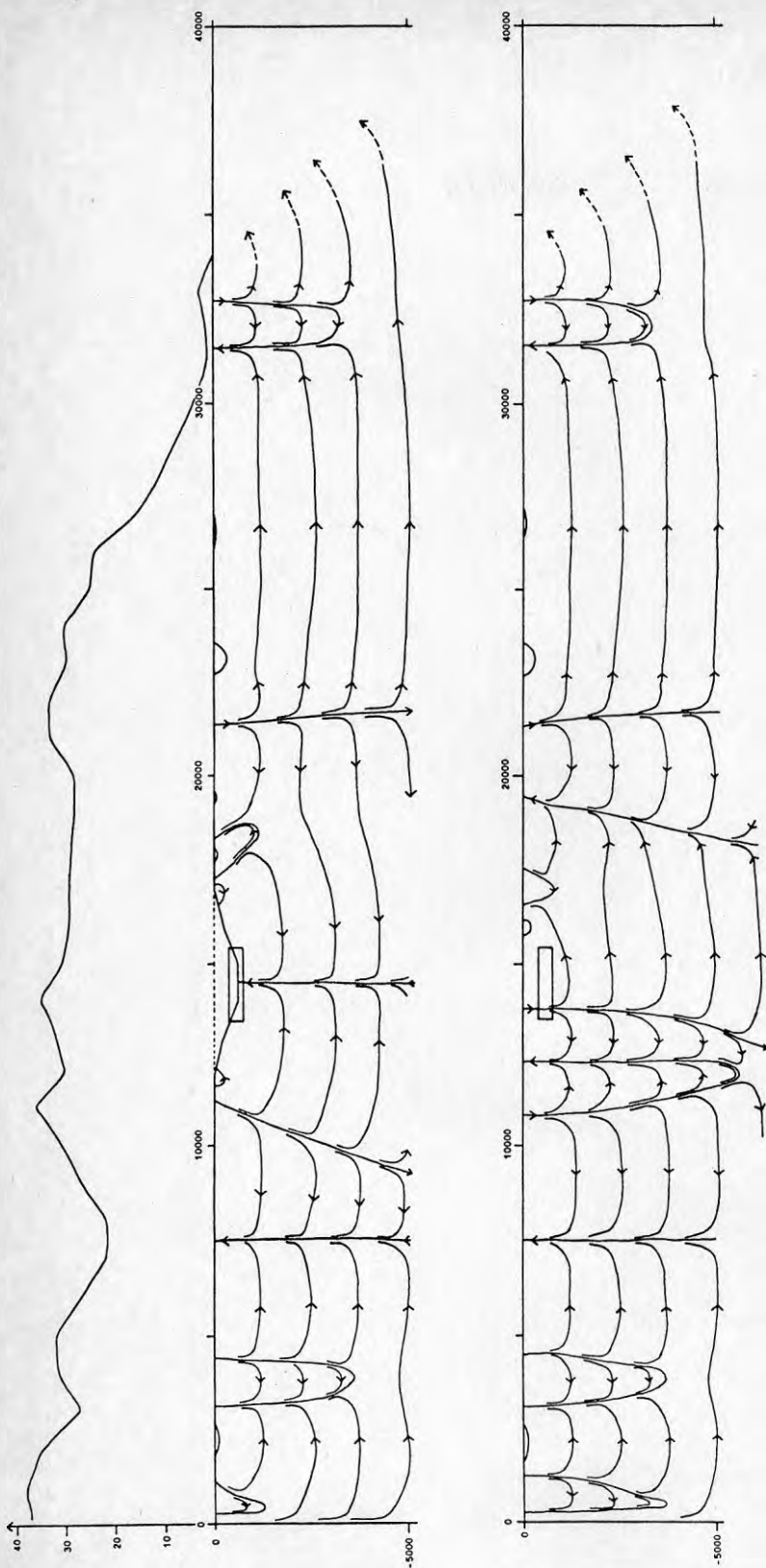


Fig 3.5 Grundvattnets strömningsbild vid kuperad terräng enligt två-
dimensionella potentialteoretiska beräkningar
Nilsson 1978 [17]

| | | | | | | |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|------------------|------------------|
| K (m ³ /s, m ²) | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁷ | 10 ⁻⁸ | 10 ⁻⁹ |
| Q (m ³ /s) | 10 ⁻² | 10 ⁻³ | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁶ | 10 ⁻⁷ |
| (m ³ /år) | 3,15·10 ⁵ | 3,15·10 ⁴ | 3,15·10 ³ | 315 | 31,5 | 3,15 |

Tabell 3.8 Grundvattenflöde vid olika hydraulisk konduktivitet genom ett lager med tvärsnittsytan 100 x 100 m. Hydrauliska gradienten I = 0,01

Vid I = 0,001 fås 1/10 av de värden på Q som anges i tabell 3.8.

Grundvattenflödet genom en enstaka horisontal spricka med sprickvidden, t, som skär genom värmelagret kan för släta sprickväggar beräknas ur ekv (4). För ett lager som har diametern 100 m fås vid hydrauliska gradienten I = 0,01 och grundvattentemperaturen T = 50°C

$$Q = 100 \cdot \frac{t^3}{12} \cdot \frac{\rho \cdot g}{\mu} \cdot I = 5,4 \cdot 10^5 \cdot t^3 \text{ m}^3/\text{s}$$

För några olika sprickvidder blir vattenföringen genom lagret

| | | | | |
|------------------------|-----|-----|---------------------|---------------------|
| t (mm) | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |
| Q (m ³ /år) | 17 | 140 | 2,1·10 ³ | 1,7·10 ⁴ |

Tabell 3.9 Vattenföringen som funktion av sprickvidden t, genom en enstaka horisontal spricka genom lagret. Hydrauliska gradienten I = 0,01

Om mer än en spricka finns ökar vattenföringen i direkt proportion till antalet sprickor.

Vid hydrauliska gradienten I = 0,001 fås 1/10 så stora värden på Q. Vid råa sprickväggar minskar Q med en faktor 3 å 4. Ingen hänsyn har tagits till den inverkan i form av lägre viskositet hos vattnet inom värmelagret som den högre vattentemperaturen där medför. I princip skulle den lägre viskositeten kunna medföra en viss lokal ökning av grundvattenströmmen genom bergmassan. I motsatt riktning verkar att bergblockens temperaturutvidning kan medföra att sprickvidderna minskar.

En grundvattenström som rinner genom ett värmelager i berg transporterar värme i grundvattenströmmens riktning. Om sprickorna i berget ligger tillräckligt tät, så att bergblocken mellan dem snabbt kan följa med i temperaturförändringar hos sprickvattnet kommer en temperaturfront i berget att fortplanta sig i grundvattenströmmens riktning med hastigheten

$$v_T = \frac{C_w}{C} \cdot q \quad (11)$$

Här är $C_w = 4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3, ^\circ\text{C}$ värmekapaciteten hos vatten och $C = 2,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3, ^\circ\text{C}$ värmekapaciteten hos granit eller gnejs. Ekv (11) gäller endast om bergets effektiva (dvs vattenförande) porositet är liten. Detta är fallet i t.ex. svenska granit- och gneisbergarter. Med de nämnda värdena på C_w och C blir ungefär $v_T = 2q$.

Med värden på q enligt tabell 3.7 ovan fås då följande fortplantningshastighet, v_T , hos en temperaturfront i berget vid olika hydraulisk konduktivitet, K , hos detta. Hydrauliska gradienten är liksom i tabell 3.7 $I = 0,01$.

| $K \text{ (m}^3/\text{s.m}^2\text{)}$ | 10^{-4} | 10^{-5} | 10^{-6} | 10^{-7} | 10^{-8} | 10^{-9} |
|---------------------------------------|-----------|-----------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $v_T \text{ (m/år)}$ | 63 | 6.3 | $6,3 \cdot 10^{-1}$ | $6,3 \cdot 10^{-2}$ | $6,3 \cdot 10^{-3}$ | $6,3 \cdot 10^{-4}$ |

Tabell 3.10 Temperaturfrontens hastighet i berget som funktion av hydrauliska konduktiviteten. Hydrauliska gradienten $I = 0,01$

Vid hydrauliska gradienten $I = 0,001$ fås 1/10 av de värden på v_T som anges i tabell 3.9.

Samtidigt som temperaturfronten förflyttas av grundvattenströmmen kommer den att flackas ut på grund av värmeledning i berget och eventuellt även på grund av kinematisk dispersion i spricksystemet.

Av tabell 3.10 framgår att om bergets hydrauliska konduktivitet är t.ex $K = 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s.m}^2$ och hydrauliska gradienten $I = 0,01$, skulle grundvattenströmmen på ett år förflytta värmen i ett värmelager 6,3 m i sidled. Samma förflyttning skulle fås om bergets hydrauliska konduktivitet är $K = 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s.m}^2$ och hydrauliska gradienten $I = 0,001$. Dessa siffror visar att för berg med tät liggande sprickor bör den hydrauliska konduktiviteten ej överskrida de nämnda värdena om värmets förflyttning på grund av en grundvattenström skall hållas inom rimliga gränser.

Som tidigare visats har svenska kristallina bergarter nästan utan undantag värden på hydrauliska konduktivitet som är lika med eller understiger $K = 10^{-5} \text{ m/s} \cdot \text{m}^2$. En eventuell naturlig grundvattenström genom värmelagret kan då inte förflytta värmen i en utsträckning som medför några påtagliga problem. Detta gäller åtminstone då värmelagret inte genomkorsas av grövre sprickor eller krosszoner.

För att bedöma inverkan av en enstaka grov spricka som genomkorsar värmelagret betraktas den värmemängd som per år föres bort av grundvattenströmmen i sprickan. Grundvattenflödets storlek vid olika sprickvidder framgår av tabell 3.9. Varje m^3 vatten för bort värmemängden $4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{C}^\circ$. Om skillnaden mellan värmelagrets temperatur och grundvattnets temperatur antages vara 80°C under 6 månader per år och 30°C under resterande 6 månader per år bortföres med varje m^3 vatten som genomströmmar en grov spricka värmemängden $230 \cdot 10^6 \text{ J} = 64 \text{ kWh}$. Med hjälp av tabell 3.9 fås då vid olika sprickvidder, t , följande värmemängder, E , som per år föres bort från värmelagret.

| | | | | |
|----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $t \text{ (mm)}$ | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 1,0 |
| $E \text{ (kWh/år)}$ | $1,1 \cdot 10^3$ | $9,0 \cdot 10^3$ | $1,3 \cdot 10^5$ | $1,1 \cdot 10^6$ |

Tabell 3.11 Från lagret bortförd värme genom en enstaka horisontal spricka som funktion av sprickvidden, t . Lagrets diameter 100 m. Hydrauliska gradienten $I = 0,01$

Värdena på E gäller vid hydrauliska gradienten $I = 0,01$. Vid hydrauliska gradienten $I = 0,001$ fås 1/10 så stora värden.

Som framgår av tabell 3.11 fås vid sprickvidder lika med eller större än 0,5 mm betydande värmeförluster. Lokalisering av ett borrhålsmagasin bör därför ske så att genomgående sprickor av denna dimension undviks. Sprickor med stor utbredning och med en sprickvidd på 0,5 mm eller mer är dock relativt sällsynta. I de fall sådana sprickor påträffas inom lagret kan de relativt lätt tätas genom cementinjektering. Alternativt kan den över lagret verkande hydrauliska gradienten minskas genom t.ex. pumpning.

3.2.4 Vattenförluster från borrhålen

Vattenförluster från borrhålen uppstår endast då ett s.k. öppet cirkulationssystem tillämpas. Fig. 3.5. De oinfödrade borrhålen är då fyllda med vatten som i normalfallet har ett högre tryck än det som svarar mot den naturliga grundvattennivån.

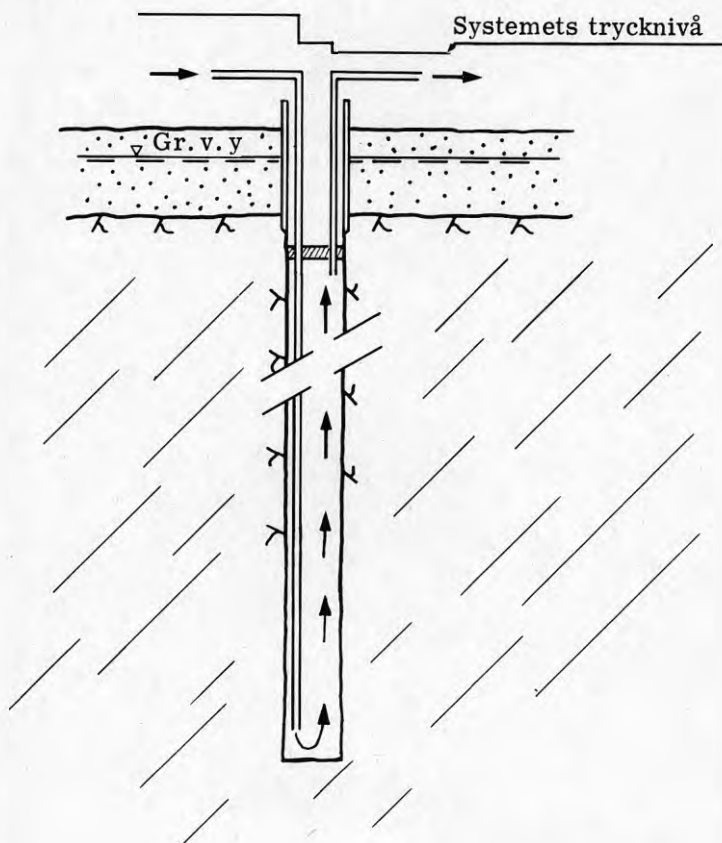


Fig. 3.5 Öppet cirkulationssystem. Principskiss

När trycknivån i borrhålen avviker från det omgivande grundvattnets trycknivå uppkommer grundvattenströmningar till eller från borrhålen. Vid övertryck i borrhålen sker en strömning i bergets spricksystem bort från lagret, dvs en vattenförlust uppstår. En sådan vattenförlust medför dels värmeförluster, dels krav att ersättningsvatten tillföres. Dessutom påverkas grundvattenytan i lagrets omgivning. Det är därför ur flera synpunkter av intresse att närmare studera vattenförlusten från borrhålen.

Beräkningsmodeller för vatten- och värmeförluster, orsakade av övertryck i borrhålen, är under utveckling men har ej kunnat färdigställas inom förstudiens ram. Preliminära resultat från dessa arbeten kan dock sammanfattas enligt följande.

Beräkningar avseende vattenströmning från borrhålen mot markyta resp omgivande berg indikerar att berggrundens hydrauliska konduktivitet ej bör överstiga $K = 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s, m}^2$. (Kristallin berggrund i Sverige synes ofta uppfylla detta villkor, åtminstone om lagret förläggs med sin överyta på tillräckligt stort avstånd från bergytan). Krosszoner och markanta sprickor i berget måste under alla förhållanden undvikas alternativt åtgärdas, t ex genom injektering.

4. FÖRPROJEKTERING

4.1 Syfte

En förprojektering av ett borrhålsmagasin har genomförts på basis av nedan angivna förutsättningar.

Förprojekteringen syftar i första hand till att

- studera omfattning och typ av erforderliga installationer och anläggningsarbeten
- möjliggöra en bedömning av realistiska anläggnings- och driftkostnader

Förprojekteringen har ej omfattat en egentlig optimering av borrhålsmagasinets utförande och drift. Med ledning av utförda parameterstudier kan det valda magasinet dock anses ekonomiskt-realistiskt utformat.

4.2 Förutsättningar

Vägledande vid val av system och utförande har varit att i största möjliga utsträckning utnyttja känd teknik och generellt tillämpbara system.

Cirkulationssystemet har därför i förprojekteringen förutsatts vara slutet. Ett lager med slutet cirkulationssystem kan ställa sig något dyrare och få en något sämre verkningsgrad än ett lager med öppet cirkulationssystem. Det slutna systemet medger å andra sidan en bättre hydraulisk kontroll och ett större oberoende av bergets sprickighet eftersom borrhålen ej behöver trycksättas.

Förprojekteringen har i övrigt baserats på följande förutsättningar

- borrhålsmagasinet förläggs i granit med 5 m täckande jordlager
- grundvattenytan är belägen i jordlagret
- borrhålen görs med diametern 150 mm och placeras med ett inbördes avstånd på 4 m
- lagringscykeln omfattar 5 månaders laddning följt av 7 månaders uttag
- laddningsenergi antages tillgänglig under 5 månader i form av 80-gradigt spillvärme med en max-effekt på 9,2 MW, fig 4.1
- fluidens maximitemperatur antages vara +80°C och dess minimitemperatur +10°C
- lagret utformas cirkulär cylindriskt med djupet 100 m och diametern 100 m
- uttagsbehovet under 7 månader överensstämmer i princip med lokaluppvärmningens variation och framgår av fig 4.1

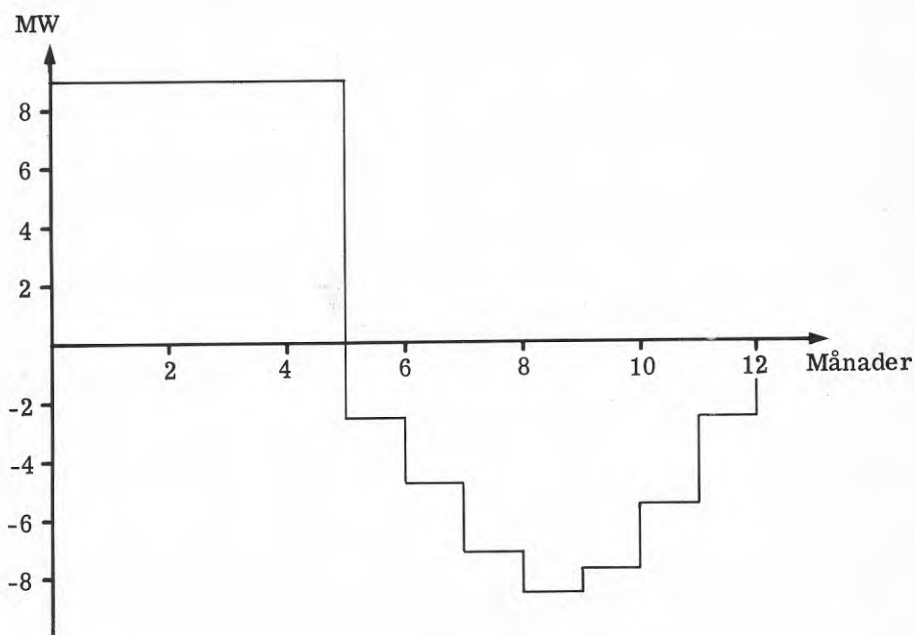


Fig 4.1 Tillgänglig laddningseffekt resp önskad uttagseffekt

Baserat på ovan angivna förutsättningar har verkliga laddnings- och uttagsförlopp beräknats med hjälp av "Continuous heat source model" [5]. Beräkningsmodellen förutsätter i princip att hela bergvolymen utnyttjas samtidigt. Samtliga borrhål genomströmmas då av lika stora flöden med lika temperatur. Fluidens, dvs det cirkulerande vattnets, temperatur kommer härigenom hela tiden att sjunka mot den låga temperatur som erfordras för att mot slutet av uttagsperioden driva ut den önskade energimängden ur bergmassan.

Beräknade laddnings- och uttagsförlopp under de tre första åren framgår av övre diagrammet i fig 4.2. Korresponderande medeltemperatur i berg resp borrhål framgår av figurens undre diagram.

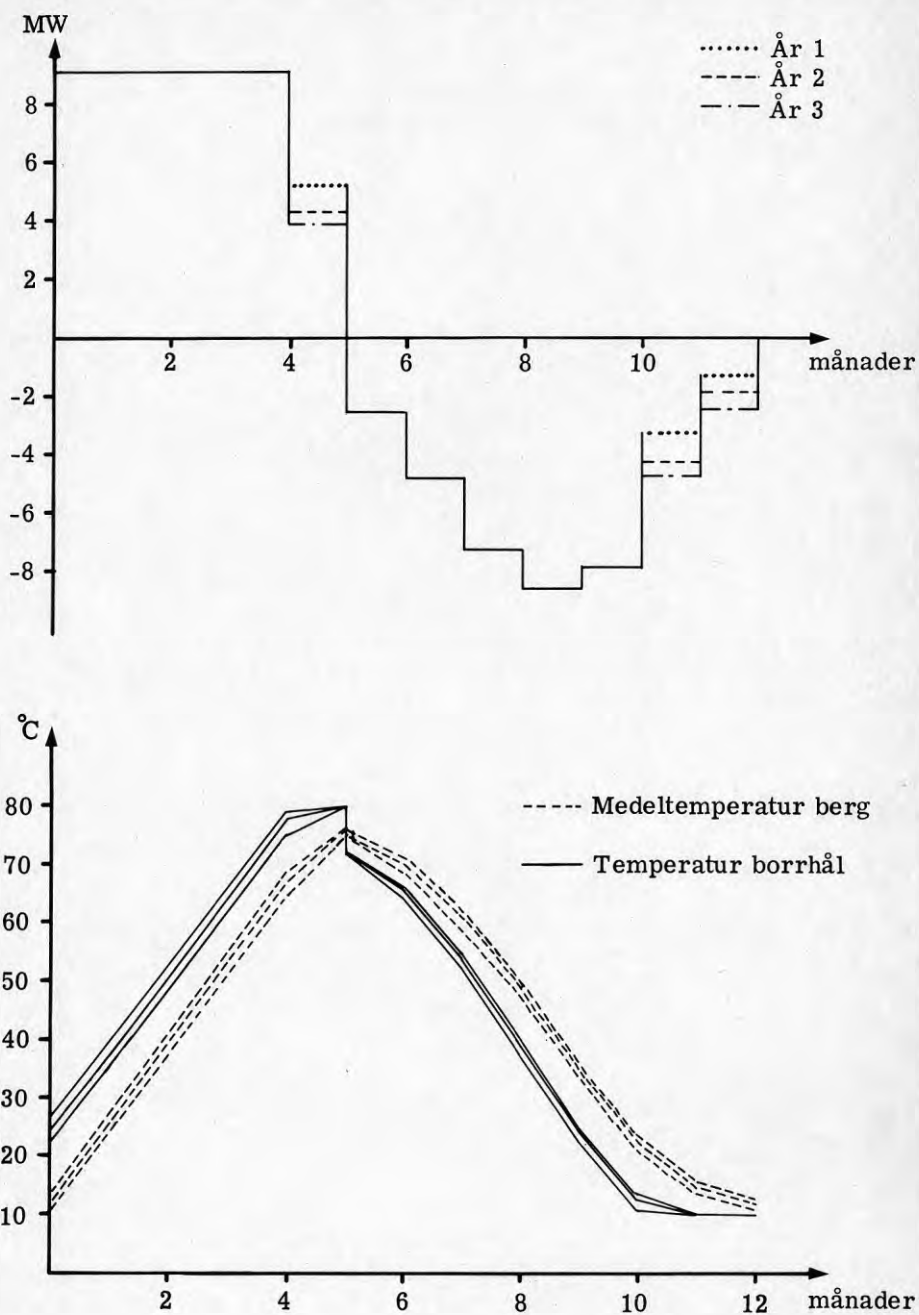


Fig 4.2 Laddnings- och uttagsförlopp under de tre första åren

Redan under den första årscykeln kan 84% av den inlagrade energin uttagas. Motsvarande värden för det andra och tredje året är 89 resp 90%.

Efter fem år är den årliga energiförlusten i det närmaste stationär och verkningsgraden har stigit till 92%, fig 4.3.

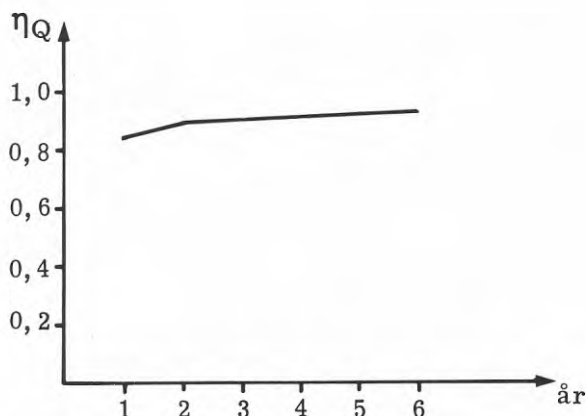


Fig 4.3 Energiverkningsgrad under de sex första åren

Insvängningsförlusten, dvs den energi som under de första åren åtgår för att värma upp omgivande berg till stationär temperaturnivå, kan uppskattas till totalt ca 15% av magasinets lagringskapacitet.

4.3 Anslutning till distributionssystem

Borrhålsmagasinet antages anslutet till ett lokalt lågtemperaturdistributionsnät med en dimensionerande framledningstemperatur på 60°C.

Bergets medeltemperatur, borrhålstemperatur samt fluidens temperatur under uttagsperioden år 5 framgår av fig 4.4. Temperaturkurvorna svarar mot det önskade energiuttaget.

Temperaturkurvan för den värmebärande fluiden ligger något lägre än borrhålstemperaturen. Detta beror på att hänsyn tagits till de övergångsmotstånd som beräknats vid det i borrhålen installerade, slutna cirkulationssystemet.

I fig 4.4 har även inlagts den för distributionssystemet erforderliga temperaturen.

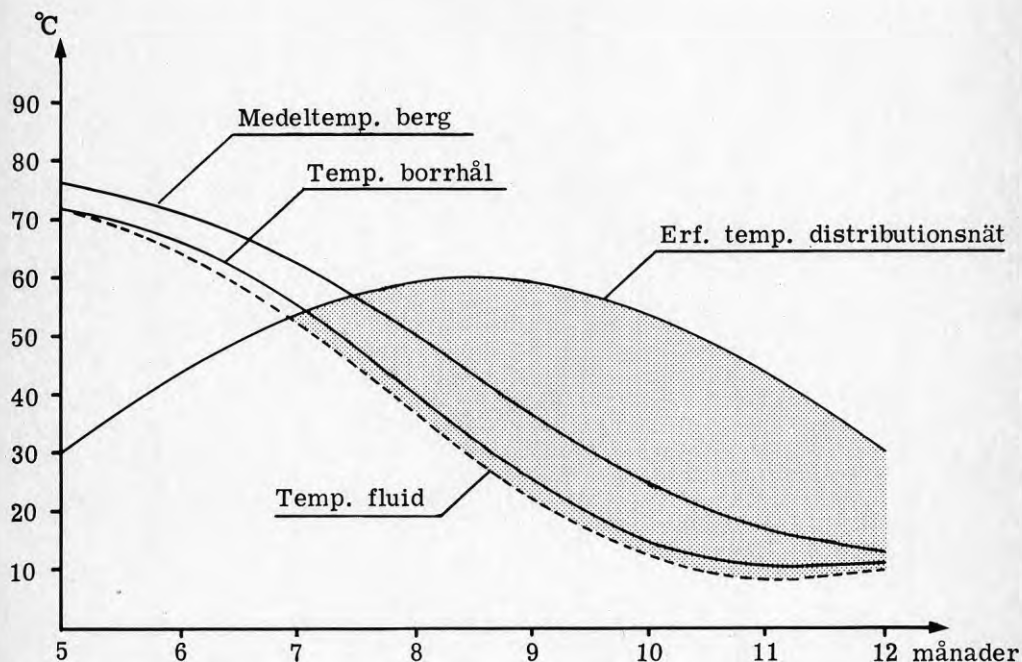


Fig 4.4 Uttagsperiod under år 5. Temperaturkurvor för borrhålsmagasin och lågtemperaturdistributionssystem

Som framgår av fig 4.4 har fluiden under de första två månaderna en så hög temperatur att värmen direkt kan växlas till distributionsnätet. Under de resterande månaderna av uttagsperioden är fluidens temperatur lägre än den temperatur som vid varje tillfälle krävs för distributionsnätet.

Värmepump kan då användas för att med fluiden som värmekälla höja distributionsnätets temperatur till erforderlig nivå. Erforderlig temperaturhöjning och motsvarande värmefaktor för värmepumpen framgår av fig 4.5.

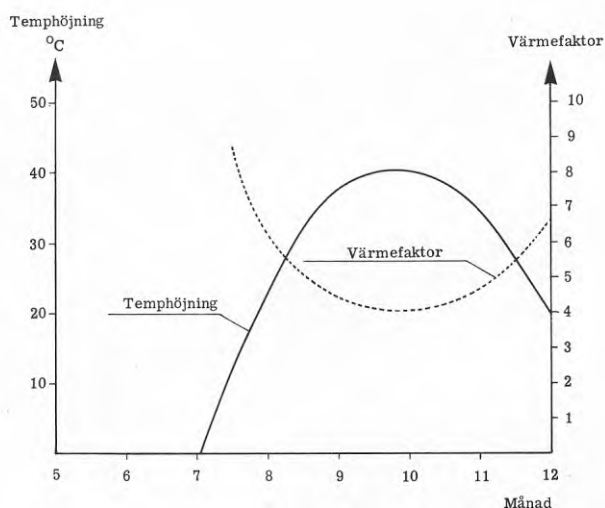


Fig 4.5 Uttagsperiod under år 5. Erforderlig temperaturhöjning och motsvarande värmefaktor för värmepump

Den genomsnittliga värmefaktorn för värmepumpen uppgår till ca 5.5. Den från lagret totalt uttagna energin är 28,0 GWh vartill kommer 4,1 GWh, tillförda genom värmepumpen.

4.4 Anläggning och installationer

4.4.1 Mark- och borrhingsarbeten

Markytan avjämnas, dräneras och avgrusas. Borrhålen, ca 560 st, utföres med diametern 150 mm och förses i jordlagret med foderrör som nedborras och fastinjekteras i berget. Borrhålen placeras med 4 m inbördes avstånd med mönster i form av liksidiga trianglar. Bortsett från foderrör vid jordgenomgång utföres borrhålen utan inklädnad.

Borrhålsmagasinet utföres, som angivits i förutsättningarna, cirkulär cylindriskt med diametern 100 m och djupet 100 m. Berget är överlagrat med ett 5 m tjockt jordlager.

4.4.2 Installationer

I borrhålen installeras U-formade, rostfria stålrör i vilka fluiden, dvs det värmebärande vattnet, cirkuleras. Stålrören har diametern 43 mm och godstjockleken 1,5 mm. U-rören anslutes till tilllopps- och returledningarna som placeras i parallella rörstråk, fig 4.6 och 4.7. Rörstråk och anslutningar är anpassade så att lagret indelas i tre koncentriska zoner med separata fluidsystem. Zonerna har sinsemellan lika stora aktiva bergvolymer och är anslutna till separata värmeväxlare.

Samlingsledningarna till värmeväxlarna har dimensionerna 200-300 mm. De parallella stamledningarna har dimensionerna 80-100 mm.

Flödet genom U-rören uppgår maximalt till $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ($0,7 \text{ l/s}$), vilket ger ett flöde på $470 \text{ m}^3/\text{h}$ genom vardera av de tre värmeväxlarna.

Rördragningen medger körbara korridorer genom magasinsområdet.

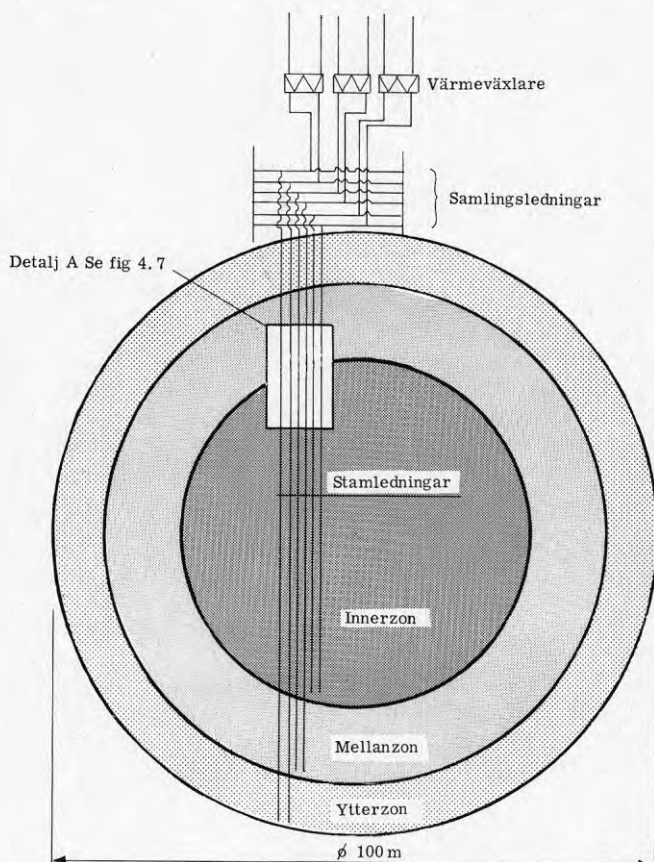


Fig 4.6 Borrhålslager med zonindelning. Principskiss

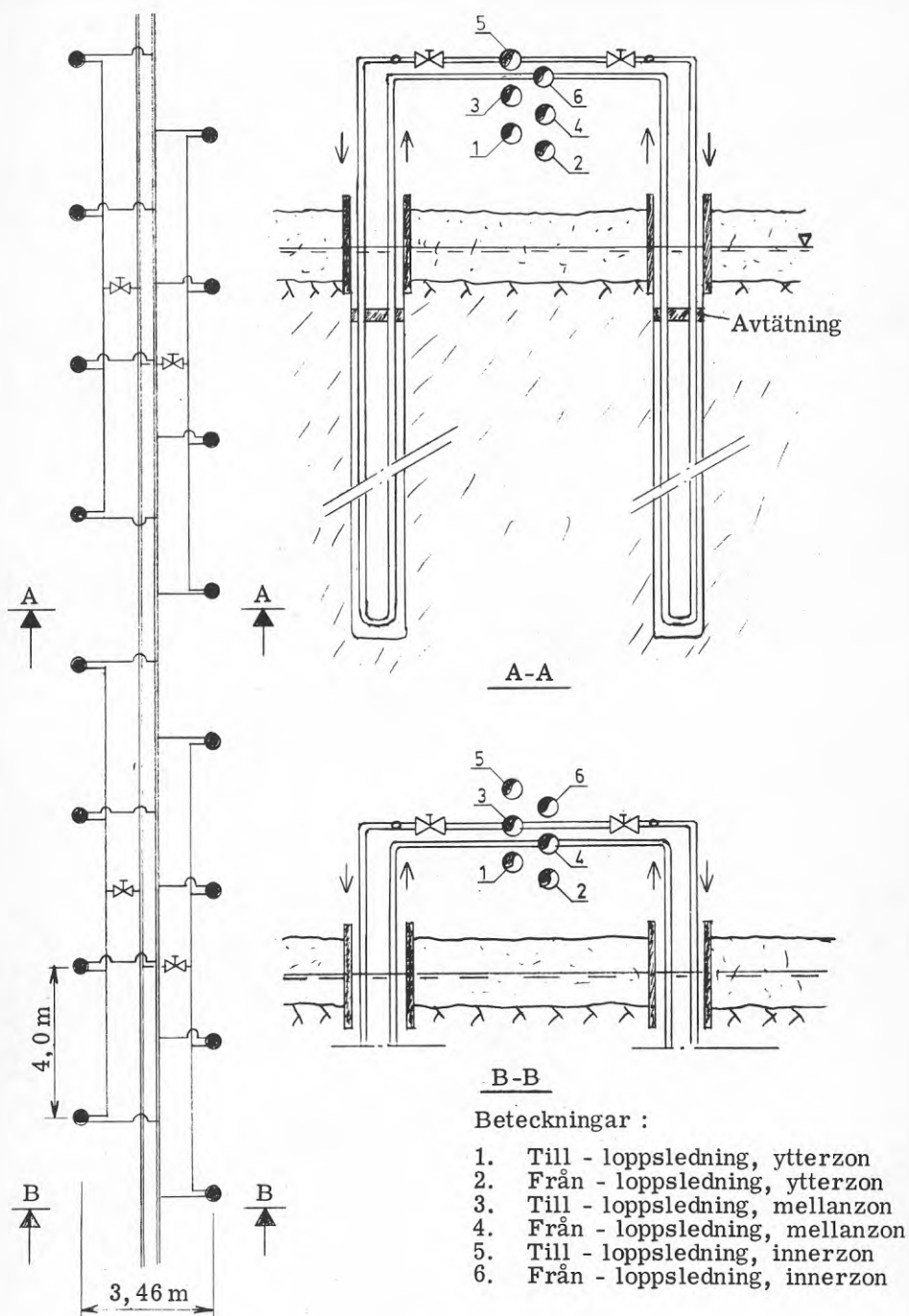


Fig 4.7 Borrhålslager. Principskiss över rörstråk och borrhålsanslutningar anpassade för lagerindelning i tre zoner

Fördelning av fluiden till de olika borrhålen sker med hjälp av parallella stamledningar försedda med avstick till korta fördelningsledningar. Från dessa fördelas fluiden med hjälp av strypventiler till de parallellkopplade U-rören i grupper om 2 å 4 borrhål. Returledningarna är försedda med påstick, ett för varje borrhål.

Det samlade installationstekniska arrangemanget illustreras av ett rörkretsschema, fig 4.8.

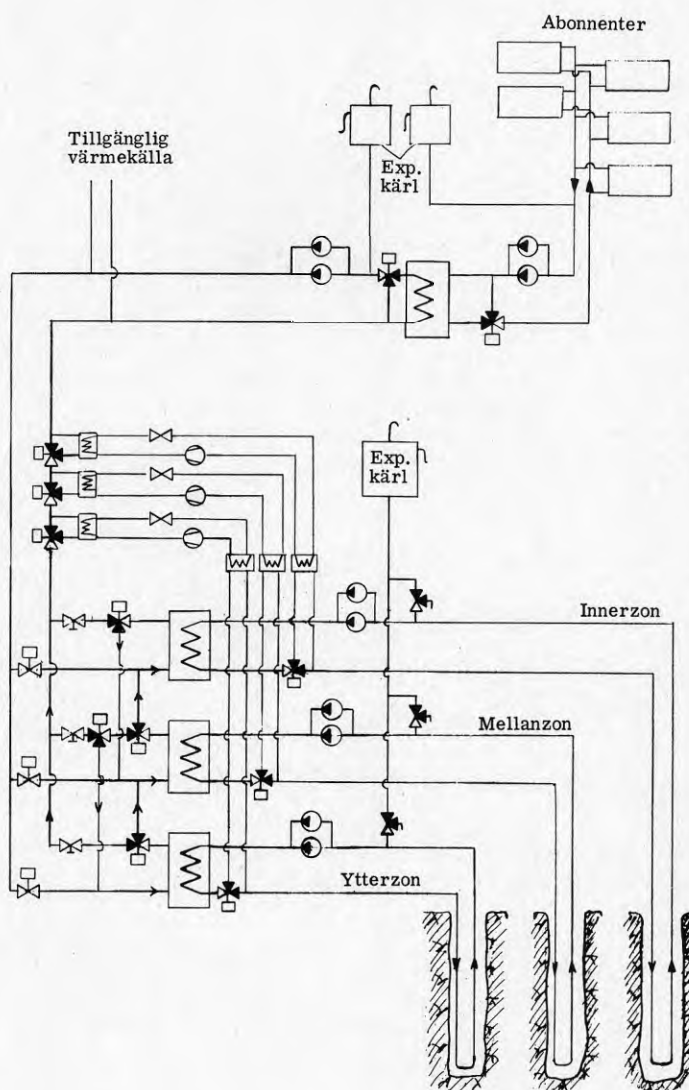


Fig 4.8 Kretsschema för borrhålsmagasin med tre lagringszoner

Den i fig 4.4 redovisade uttagstemperaturkurvan för fluiden baseras på att alla tre zonerna utnyttjas samtidigt och med lika effekt. Ovan beskrivet installationssystem medger en sådan drift.

En driftstrategi som utnyttjar zonindelningen bör bli kunna bättre anpassa uttagstemperaturerna till de temperaturer som distributionssystemet erfordrar. Behovet av värmepump kan då minskas eller i vissa fall toms elimineras.

Beräkningsmodellen för en sådan driftstrategi utvecklas för närvarande vid institutionen för matematisk fysik, LTH, i samarbete med AIB.

4.4.3 Byggnader

Erforderliga byggnadsarbeten omfattar

- byggnad för pumpar, värmeväxlare, värmepump samt styr- och reglerutrustning
- skydd av rörsystem inkl borrhålsanslutningar

Rörsystemet kan skyddas för väder och vind, värmeförluster etc genom att hela magasinsytan täcks med en enkel, låg överbyggnad. Stora fördelar erhålles samtidigt genom att hela rörsystemet är lättåtkomligt och att en enkel rörisolering kan accepteras. En uppenbar nackdel är dock de svårigheter som uppstår vid t ex byte av U-rör, uppborrning av igensatta hål etc.

Alternativt lämnas rörsystemet under bar himmel varvid dock en väderbeständig värmeisolering måste anbringas. Ytterligare alternativ kan vara förläggning i kulvert eller i separata, längs rörstråken uppförda skydd.

4.5 Kostnader

4.5.1 Anläggningskostnad

Anläggningskostnaden har beräknats för ett borrhålslager enligt ovan redovisade förprojektering. Vid kostnadsberäkningen har förutsatts att lagret ej förses med överbyggnad utan att rörsystemet skyddsisoleras för utomhusförläggning.

I anläggningskostnaden har ej inräknats kostnaden för spetslast- eller reservvärmekälla.

Följande kostnader har beräknats:

| | <u>Milj kr</u> | <u>Milj kr</u> |
|--|----------------|----------------|
| Markberedning | 0,25 | |
| Borrning + foderrör i jord | 7,70 | |
| Rörledningar i borrhål | 3,70 | |
| Rörledningar ovan mark | 2,00 | |
| Isolering av rör | 1,70 | |
| Värmeväxlare | 0,70 | |
| Kringutrustning (pumpar, ventiler, expansionskärl etc) | 0,50 | |
| Styr- och reglerutrustning | 2,00 | |
| Värmecentral + rörfundament | 1,00 | |
| Uppladdning (48 GWh, 0,05 kr/kWh) | 0,24 | |
| Oförutsett (10%) | 2,10 | 19,8 |
| Projektering (10%) | 2,30 | |
| Summa | | 24,2 |
| Värmepump (3 x 2,8 MW, 1300 kr/kW) | 11,10 | |
| Summa | | 35.3 |

4.5.2 Driftkostnad

Följande årliga driftkostnader har beräknats

| <u>Rörliga kostnader:</u> | <u>Milj kr</u> | <u>Milj kr</u> |
|--|----------------|----------------|
| Laddningsenergi (spillvärme), 32 GWh, 0,05 kr/kWh | 1,60 | |
| El, värmepumpar (4,5 GWh, 0,20 kr/kWh) | 0,90 | |
| El, övrigt (2% av levererad energi) | 0,11 | |
| | | 2,61 |

Fasta kostnader:

| | | |
|-----------------------------------|------|------|
| Tillsyn, underhåll, service (2%) | 0,73 | |
| Räntor och amortering (4%, 15 år) | 3,18 | |
| Total driftkostnad | | 6,52 |

Från lagret kan totalt levereras 32,1 GWh/år. Härav utgör 28,0 GWh lagrad och återvunnen energi, medan 4,1 GWh utgörs av tillsatsenergi till värmepumparna.

Totalkostnaden kan då beräknas till 0,20 kr/kWh. Härvid har inräknats kostnader för laddningsenergi med 0,05 kr/kWh.

Under antagande av kostnadsfri laddningsenergi begränsas totalkostnaden till 0,15 kr/kWh.

5. FORTSATTA ARBETEN

Borrhålslagret synes såväl tekniskt som ekonomiskt utgöra ett intressant alternativ till andra storskaliga värmelager.

Fortsatta studier och försök är dock nödvändiga för att slutgiltigt bedöma borrhålslagrets kommersiella användbarhet.

De fortsatta arbetena bör omfatta såväl teoretiska studier som laboratorie- och fältförsök. Följande aktiviteter framstår som angelägna.

Teoretiska studier

- Utveckling av beräkningsmodeller för termiska förlopp vid olika driftstrategier.
- Utveckling av beräkningsmodeller för bestämning av vattenläckage från trycksatta borrhål mot markyta och omgivande berg.
- Optimering av driftstrategi och motsvarande installationstekniska arrangemang inkl styr- och reglerutrustning.
- Studium av olika metoder att minska den naturliga grundvattenströmningen genom lagret och dess närmaste omgivning.

Laboratorie- och fältförsök

- Studium av värmeöverföring mellan borrhålsväggen och den värmeförande fluiden vid olika rörmaterial, strömningsförhållanden etc.
- Studium av kemiska utlösningar och utfällningar vid öppna resp slutna cirkulationssystem.
- Undersökning av beständigheten hos borrhål utsatta för cykliska temperaturvariationer.
- Praktiska försök avseende olika berg- och installationstekniska arbeten, t ex avtätningar och isolering av borrhål och isolering av markledningar.
- Verifiering av beräkningsmodeller.

Ovan nämnda arbeten beräknas kunna utföras under 1981. Ett experiment- och demonstrationsprojekt bör därefter kunna påbörjas 1982.

Referenser

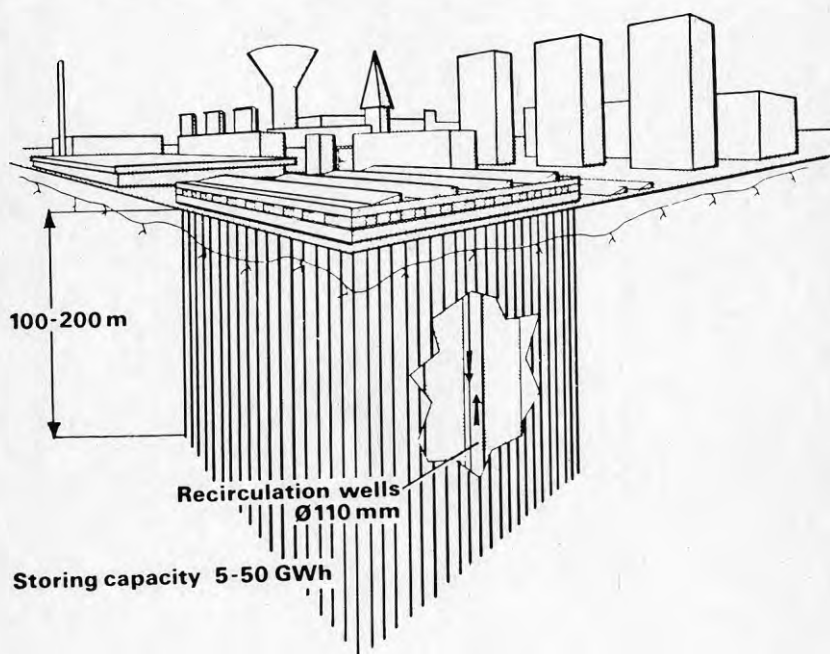
1. Brun, G 1967
Le stockage thermique dans le sol, en vue de regularisation de l'energie solaire. Communication présentée 1967 au Centre de Perfectionnement Technique.
2. Platell, O 1979
Underground storage of solar energy for residential heating. Rapport från konferensen "Bygga under mark - spara olja", Stockholm jan 1979.
3. Kadesjö, H 1979
Säsongslagring av värme i berg. Förstudie. (Pågående BFR-studie).
4. Johansson, B och Nordell, B 1980
Berglager, en anläggning för säsongslagring av värme. Höskolan i Luleå, forskningsrapport TULEA 1980:14.
5. Johansson, M och Claesson, J 1979
Continuous heat source model for ground heat storage. BFR D34:1980.
6. Wenner, C G 1951
Grundvattenförhållanden i södra Sveriges berggrund. Teknisk Tidskrift 81, 1101-1103.
7. Mejer, O och Sund, B 1952
Geologins betydelse för vattenbörning i Sverige. Vattenhygien 8, 1-11.
8. SGU 1977
Grundvattentillgångar i Sverige.
9. Carlsson, L och Carlstedt, A 1976
Estimation of transmissivity and permeability in Swedish bedrocks. Nordic Hydrological Conference and Nordic Hydrology 8, 1977, 103-116.
10. Carlsson, A och Olsson, T 1977
Hydraulic properties of Swedish crystalline rocks. Bull Geological Inst, University of Uppsala, N S 7.
11. Bjurström, S m fl 1977
Lagring och transport av vattenburen värme i berg. Fältförsök Befo nr 11:14/77.
12. Claesson, T J P och Ronge, B S H 1980
Water-rock interaction problems when storing and distributing hot water in unlined rock tunnels and caverns. Rock store 80, Volume 2, 587-592.
Claesson, T J P och Ronge, B S H 1979
Varmvattens urlakande effekt på bergmaterial - autoklavstudier och förändringar i vattenkemin. Förstudie rörande kemiproblem vid lagring och transport av vattenburen värme i berg. Studsvik/E2-79/149.

13. Louis, C 1967
Strömungsvorgänge in klüftigen Medien und ihre
Wirkung auf die Standsicherheit von Banwerken
und Böschungen im Fels, Fakultät für Bauingenieur-
und Vermessungswesen der Technischen Hochschule
Karlsruhe, Karlsruhe, 1967.
14. Stagg, K G och Zienkiewicz, O C 1968
Rock mechanics in engineering practice, New York 1968.
15. Snow, D 1968
Rock fracture spacings, openings and porosities,
Journal of the Soil Mechanics and Foundations
Division, ASCE, Vol 94, No SM 1, January, 1968.
16. Hult, A et al 1978
Permeabilitetsbestämningar, KBS, Teknisk Rapport 61,
Stockholm, 1978 (Kärnbränslesäkerhet, Fack, 102 40
Stockholm).
17. Nilsson, L Y et al 1978
Teoretiska studier av grundvattenrörelser, KBS,
Teknisk Rapport 47, Stockholm, 1978 (Kärnbränsle-
säkerhet, Fack, 102 40 Stockholm).

Summary

A multiple well heat storage in rock is a seasonal storage. Its function is based on the heat conductivity and storage capacity properties of the rock.

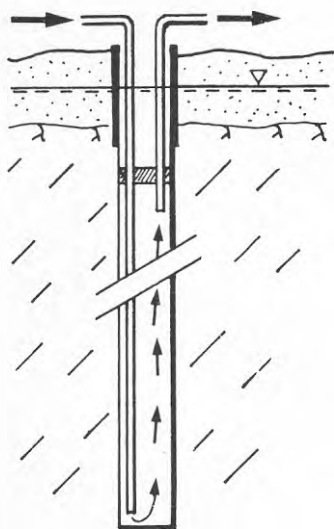
The heat is transferred to or from the rock by means of water which is circulated through a great number of boreholes, or wells. The boreholes are supposed not to be cased.



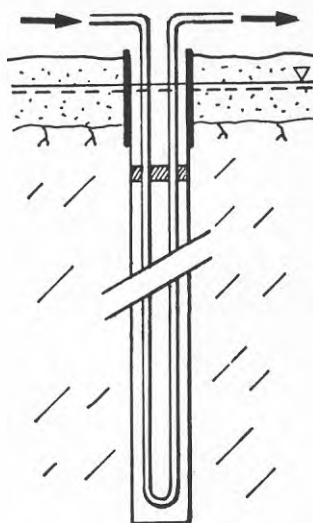
Multiple well heat storage. Principle sketch

The heat storage capacity of e.g. gneiss and granite is about $0.6 \text{ kWh/m}^3, ^\circ\text{C}$, i.e. half of the corresponding figure for water. Hence, a multiple well heat storage must have a volume twice as large as e.g. a water-cavern with the same storage capacity at the same temperature difference between the water injected and the water extracted.

The heat carrying water, the fluid, can be circulating through the wells in open or closed circuit systems.



Open circuit system.
Charge or discharge



Closed circuit system.
Charge or discharge

In a closed circuit system, the fluid is circulated through U-shaped tubes inserted in the wells. The groundwater in the wells transfers the heat to and from the tube and the rock. The circulating fluid has no direct contact with the rock. Therefore, even if the storage is constructed in a fissured rock, there will be no loss of water. Neither will there be any problems concerning chemical precipitations in tubes, heat-exchangers, etc. A heat storage with a closed circulation system can thus be constructed anywhere provided that the natural ground water flow through the rock is not too strong. Comprehensive investigations concerning the permeability of the Swedish bedrock, indicate that generally the natural groundwater flow would not seriously affect upon any heat storage of a reasonable size.

In an open circuit system, the fluid is conducted through a tube down to the bottom of the well where it is released and is in direct contact with the rock. In order to limit heat and water loss a multiple well heat storage with an open circulating system implies rock with a relatively low permeability.

A pre-design of a full scale multiple well heat storage, indicates that the storage can be constructed with well-known technology.

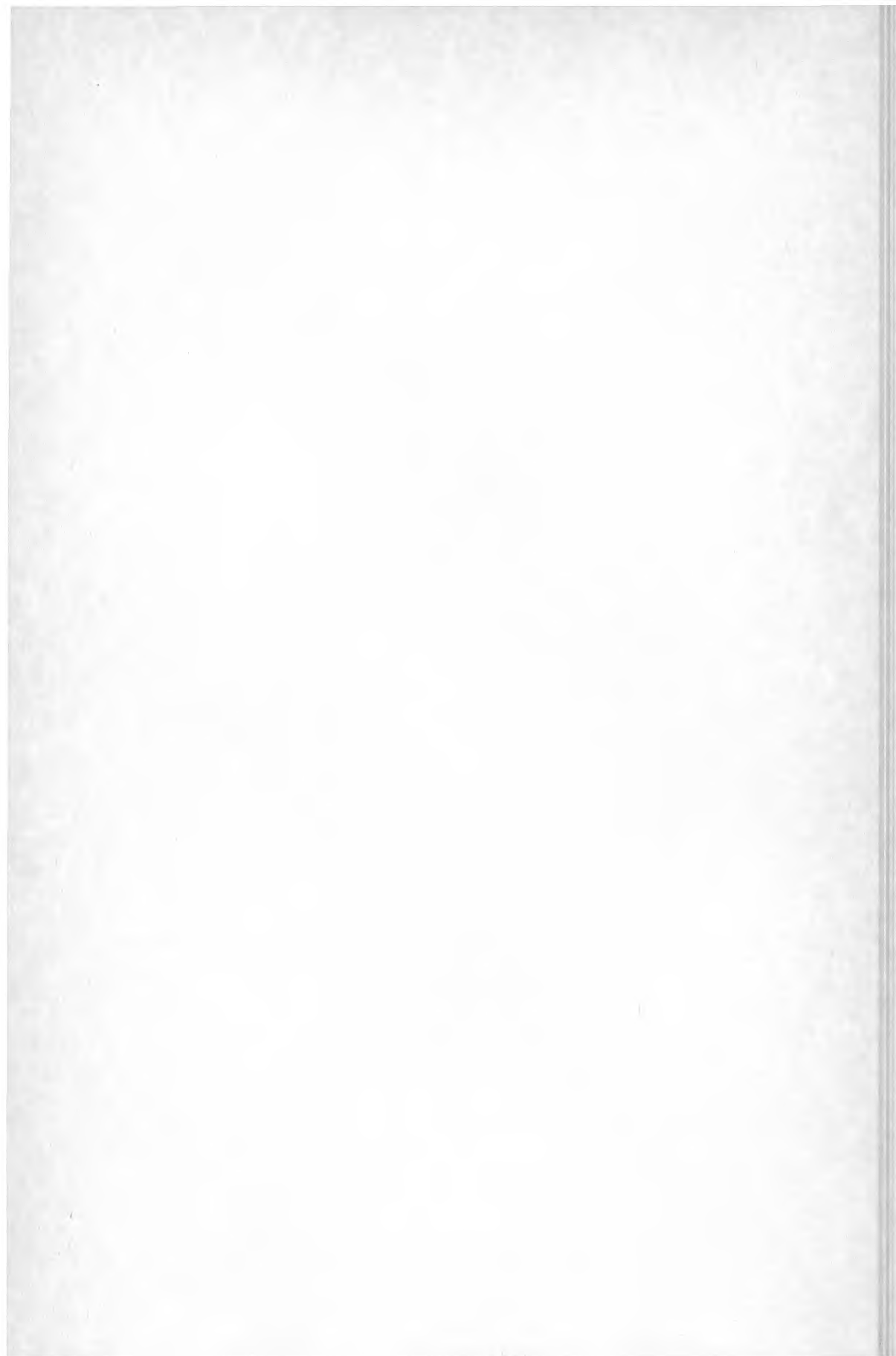
According to the pre-design, a multiple well heat storage with a storage capacity of 30 GWh can be constructed at a cost of about 1.3 Sw.Crs per stored and recovered kWh. The energy efficiency will be about 90 % with a lower temperature limit of $+10^{\circ}\text{C}$.

Operation and capital expenditures have been estimated to 0.16 Sw. Cr/kWh assuming that waste heat or other energy for loading the storage is available at no cost.

A multiple well heat storage is appropriate to be constructed in stages. In this way not only capital outlay can be minimized but also heat losses from the storage.







Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
791694-1 från Statens råd för byggnadsforskning
till AIB — Allmänna Ingenjörbyrå AB, Stockholm.

R66: 1981

ISBN 91-540-3512-0

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6700366

Abonnemangsgrupp:
W. Installationer

Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 7853
103 99 Stockholm

Cirka pris: 30 kr exkl moms